

Analyse des Straßenverkehrs mit verteilten opto-elektronischen Sensoren

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften (doctor rerum naturalium)
im Fach Informatik

eingereicht an der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II
der Humboldt-Universität zu Berlin

von
Dipl.-Geograph Adrian Schischmanow, 11.9.1972

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin
Professor Dr. J. Mlynek

Dekan der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II
Professor Dr. U. Küchler

Gutachter/ Gutachterin
1. Professor Dr. R. Reulke
2. Professor Dr. B. Lenz
3. Professor Dr. H. Jahn

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Mai 2005

Zusammenfassung

Aufgrund der steigenden Verkehrsnachfrage und der begrenzten Ressourcen zum Ausbau der Straßenverkehrsnetze werden zukünftig größere Anforderungen an die Effektivität von Telematikanwendungen gestellt. Die Erhebung und Bereitstellung aktueller Verkehrsdaten durch geeignete Sensoren ist dazu eine entscheidende Voraussetzung. Gegenstand dieser Arbeit ist die großflächige Analyse des Straßenverkehrs auf der Basis bodengebundener und verteilter opto-elektronischer Sensoren. Es wird ein Konzept vorgestellt, dass eine von der Bilddatenerhebung bis zur Bereitstellung der Daten für Verkehrsanwendungen durchgehende Verarbeitungskette enthält. Der interdisziplinäre Ansatz bildet die Basis zur Verknüpfung eines solchen Sensorsystems mit Verkehrstelematik. Die Abbildung des Verkehrsgeschehens erfolgt im Gegensatz zu herkömmlichen bodengebundenen Messsystemen innerhalb größerer zusammenhängender Ausschnitte des Verkehrsraums. Dadurch können streckenbezogene Verkehrskenngrößen direkt bestimmt werden. Die Georeferenzierung der Verkehrsobjekte ist die Grundlage für eine optimale Verkehrsanalyse und Verkehrssteuerung. Die generierten Daten sind Basis zur Findung und Verifizierung von Theorien und Modellen sowie zur Entwicklung verkehrsadaptiver Steuerungsverfahren auf mikroskopischer Ebene. Es wird gezeigt, wie aus der Fusion gleichzeitig erhaltener Daten mehrerer Sensoren, die im Bereich des Sichtbaren und im thermalen Infrarot sensitiv sind, ein zusammengesetztes Abbildungsmosaik eines vergrößerten Verkehrsraums erzeugt werden kann. In diesem Abbildungsmosaik werden Verkehrsdatenmodelle unterschiedlicher räumlicher Kategorien abgeleitet. Die Darstellung des Abbildungsmosaiks mit seinen Daten erfolgt auf unterschiedlichen Informationsebenen in gekodierten Karten. Die Bewertung mikroskopischer Verkehrsprozesse wird durch die besondere Berücksichtigung der Zeitkomponente bei der Visualisierung möglich. Die vorgestellte Verarbeitungskette beinhaltet neue Anwendungsbereiche für geografische Informationssysteme (GIS). Der beschriebene Ansatz wurde konzeptionell bearbeitet, in der Programmiersprache IDL realisiert und erfolgreich getestet.

Abstract

The growing demand of urban and interregional road traffic requires an improvement regarding the effectiveness of telematics systems. The use of appropriate sensor systems for traffic data acquisition is a decisive prerequisite for the efficiency of traffic control. This thesis focuses on analyzing road traffic based on stationary and distributed ground opto-electronic matrix sensors. A concept which covers all parts from image data acquisition up to traffic data provision is presented. This interdisciplinary approach establishes a basis for the integration of such a sensor system into telematics systems. Unlike conventional ground stationary sensors, the acquisition of traffic data is spread over larger areas in this case. As a result, road specific traffic data can be measured directly. Georeferencing of traffic objects is the basis for optimal road traffic analysis and road traffic control. This approach will demonstrate how to generate a spatial mosaic consisting of traffic data generated by several sensors with different spectral resolution. For traffic flow analysis the realisation of special 4D data visualisation methods on different information levels was an essential need. The data processing chain introduces new areas of application for geographical information systems (GIS). The approach utilised in this study has been worked out conceptually and also successfully tested and applied in the programming language IDL.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	1
2	Stand der Entwicklung	5
2.1	Luftgestützte Verkehrsdatenerfassung	5
2.2	Bodengebundene Verkehrsdatenerfassung	5
2.2.1	Aktive Verfahren	6
2.2.2	Passive opto-elektronische Verfahren	7
2.2.3	Sonstige Verfahren	9
2.3	Geografische Informationssysteme	10
2.4	Konsequenzen	11
3	Anforderungen an ein ideales passives opto-elektronisches Sensorsystem	12
3.1	Skalierbarkeit	12
3.2	Datenaktualität	13
3.3	Zeitliche Datenauflösung	14
3.4	Räumliche Datenverfügbarkeit	15
3.5	Verkehrsobjektdetektion und Detektionssicherheit	25
3.6	Verkehrsobjektverfolgung	26
3.7	Datenvergleichbarkeit	27
3.8	Datenfusion	27
3.9	Verkehrskenngrößen	28
3.10	Erfassungsbereiche für die Verkehrskenngrößenberechnung	30
3.11	Datenmanagement	31
3.12	Schnittstellen	35
3.12.1	Geografische Informationssysteme	35
3.12.2	Verkehrsapplikationen	37
4	Sensor- und Datenverarbeitungskonzept	38
4.1	Überblick	38
4.2	Systemkomponenten und Verarbeitungsoperationen	39
4.3	Datenmanagement	45
5	Umsetzung des Sensor- und Datenverarbeitungskonzepts	48
5.1	Umsetzung des Sensorkonzepts	49
5.1.1	Testfeld	49

5.1.2	Passpunktfeld	50
5.1.3	Sensoren	52
5.1.4	Messkampagnen zur Bilddatenerhebung	55
5.2	Umsetzung des Datenverarbeitungskonzepts	58
5.2.1	Datenverarbeitungs- und Datenflussmodell	59
5.2.2	Datenbankmodell	64
5.2.3	Konfiguration	68
5.2.3.1	Geometrische Kamerakalibration	68
5.2.3.2	Konfiguration von Erfassungsbereichen mittels Regions of Interest	72
5.2.3.3	Konfiguration von Verkehrsdatenerfassungsbereichen mittels Fahrspuren	74
5.2.4	Datenverarbeitung	84
5.2.4.1	Verkehrsobjektdatengenerierung	84
5.2.4.2	Verkehrskenngrößenberechnung	91
5.3	Ergebnisdarstellung	100
6	Verkehrsapplikationen	103
6.1	Lichtsignalanlagensteuerung	103
6.2	Verkehrssimulation	105
6.3	Routing	106
7	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Literatur	108
	Anhang A: Abkürzungen	
	Anhang B: Tabellen	
	Anhang C: Entwicklungswerkzeuge	
	Erklärung	
	Danksagung	
	Lebenslauf	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Anforderungen verschiedener Verkehrsanwendungen an die zeitliche Datenauflösung, Beispiel	15
Abb. 2	Sensoranordnung an einem Verkehrsknoten, Beispiel	16
Abb. 3	Zusammenhang zwischen Sensorgeometrie, Aufnahmehöhe, Blickfeld und Ortsauflösung bzw. Bodenpixelabstand (GSD)	17
Abb. 4	Schnittfläche zwischen Sensor und Straßenebene in Abhängigkeit des vertikalen Blickwinkels α zwischen der optischen Achse und der Schnittebene	18
Abb. 5	Blickfeld und Ortsauflösung bzw. Bodenpixelabstand (GSD) in Abhängigkeit der Sensorgeometrie und Entfernung zwischen Sensor und Objekt	24
Abb. 6	Einteilung der Verkehrskenngrößen unter räumlichen und zeitlichen Gesichtspunkten, Beispiel	31
Abb. 7	Anforderung an die Datenverwaltung innerhalb der Prozesskette, Beispiel	34
Abb. 8	Logischer Aufbau des Sensornetzwerks, Beispiel	39
Abb. 9	Datenverarbeitungskette, Beispiel	44
Abb. 10	Datenmanagement, Verteilung von Datenspeichern auf einzelnen logischen Ebenen, Beispiel	47
Abb. 11	Testfeld Verkehrsknoten Rudower Chaussee - Wedegornstraße	50
Abb. 12	Sensoren	52
Abb. 13	Sensoren	53
Abb. 14	Datenfusion unterschiedlicher Sensortechnologien	56
Abb. 15	Bilddatensynchronisation, Unterschiedliche Sensorstandorte und Blickrichtungen längs zur Straße	57
Abb. 16	Bilddatensynchronisation, Unterschiedliche Sensorstandorte und Blickrichtungen quer zur Straße	57
Abb. 17	Datenverarbeitungs- und Datenflussmodell	60
Abb. 18	Datenverarbeitung, Prozesskette und abgeleitete Daten, Verkehrsobjektdatenerzeugung	62

Abb. 19	Datenverarbeitung, Prozesskette und abgeleitete Daten, Verkehrskenngrößenberechnung	63
Abb. 20	Datenbankmodell, Tabellen und Relationen	66
Abb. 21	Datenbankmodell, Tabellen und Relationen	67
Abb. 22	Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten	69
Abb. 23	Position Ist- (Vierecke) und Sollkoordinaten (Dreiecke) der Passpunkte (Passpunkt-ID)	70
Abb. 24	GIS-Modul zur Konfiguration von Erfassungsbereichen mittels Regions of Interest	73
Abb. 25	Klassifikation von Verkehrsobjekttrajektorien	78
Abb. 26	Klassifikation von Verkehrsobjekttrajektorien, Reale Daten	79
Abb. 27	Mittlere Fahrspuren, aus klassifizierten Verkehrsobjekttrajektorien ermittelt	81
Abb. 28	Festlegung von Erfassungsbereichen mittels Fahrspuren	83
Abb. 29	Verkehrsobjektextraktion durch die Bildverarbeitung, Tagaufnahme VIS-Sensor	86
Abb. 30	Verkehrsobjektextraktion durch die Bildverarbeitung, Nachtaufnahme TIR-Sensor	86
Abb. 31	Projektion von 3D-Objekten in eine Ebene	90
Abb. 32	Zuordnung von Verkehrsobjekten (schwarz) zu Fahrspurpunkten (blau), Erfassungsbereichen (grün, rot) und Fahrspuren (blau)	93
Abb. 33	Rekonstruktion von Verkehrsszenen, aus den Daten zweier Sensoren (Sensorstandort-ID 1,2, Abb.11) zusammengesetztes Verkehrsdatenmodell an einem Verkehrsknoten	101
Abb. 34	Vergleich Festzeitsteuerung zu adaptiver Steuerung, Phasenumlaufbezogene Aufstelllängen einer Fahrspur am Verkehrsknoten Rudower Chaussee - Wegedornstraße bei erhöhter Verkehrsstärke	104
Abb. 35	Vergleich Festzeit- zu adaptiver Steuerung, Stundenbezogene Aufstelllängen benachbarter Verkehrsknoten im Umfeld des Verkehrsknotens Rudower Chaussee - Wegedornstraße bei erhöhter Verkehrsstärke	104
Abb. 36	Mikroskopische Verkehrssimulation SUMO	105

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Sensorkonfigurationen bei XGA-Auflösung	20
Tab. 2	Auswirkungen der Bildverarbeitungsanforderungen bezüglich Ortsauflösung auf die max. erlaubte Entfernung zwischen Sensor und Objekt	21
Tab. 3	Bewertung der Eignung verschiedener Sensorkonfigurationen bei verschiedenen Standorten und vertikalen Blickwinkeln zum Straßenraum	23
Tab. 4	Bewertung der VIS-Sensorkonfigurationen bezüglich ihrer Eignung zur Verkehrsdatenerhebung	54
Tab. 5	Sensoren	116
Tab. 6	Anforderungen an das Sensorsystem, Räumliche Datenverfügbarkeit	116
Tab. 7	Anforderungen an das Sensorsystem, Sensorgeometrie	117
Tab. 8	Anforderungen an das Sensorsystem, Detektionssicherheit	117
Tab. 9	Anforderungen an das Sensorsystem, Datenaufkommen am Sensor je beobachteter Fahrspur	117
Tab. 10	Äußere Orientierung, Sensorstandort-ID 1, Sensor-ID 1	118
Tab. 11	Äußere Orientierung, Sensorstandort-ID 2, Sensor-ID 1	118
Tab. 12	Abweichung zwischen Objektkoordinaten der Passpunkte (DGPS-Messung) und photogrammetrisch ermittelten Objektkoordinaten, Sensorstandort-ID 1, Sensor-ID 1	118
Tab. 13	Abweichung zwischen Objektkoordinaten der Passpunkte (DGPS-Messung) und photogramme-trisch ermittelten Objektkoordinaten, Sensorstandort-ID 2, Sensor-ID 1	120
Tab. 14	Statistische Abweichung zwischen Objektkoordinaten der Passpunkte (DGPS-Messung) und photogrammetrisch ermittelten Objektkoordinaten	120
Tab. 15	Geometrische Representation von Fahrspuren	120

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Belastungen innerstädtischer und interregionaler Straßenverkehrsnetze durch den steigenden individuellen Personenkraftverkehr nimmt stetig zu. Staus und zähflüssiger Verkehr sind längst keine Ausnahme mehr, sondern ein fester Bestandteil des täglichen Verkehrsgeschehens. Sie sind mit negativen Folgen für Umwelt und Volkswirtschaft verbunden. Dem Weissbuch der europäischen Union zur künftigen Entwicklung einer gemeinsamen europäischen Verkehrspolitik zufolge liegen die Ursachen der hohen Verkehrsbelastung in unausgewogenen Verkehrsanteilen einzelner Verkehrsträger und räumlicher Disparitäten. Demnach stieg die tägliche Mobilität der Personen innerhalb der europäischen Union zwischen 1970-1998 von durchschnittlich 17 auf 35km. Der Anteil des Personenkraftverkehrs erhöhte sich im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern in den vergangenen Jahren überproportional. Der Fahrzeugbestand hat sich in den vergangenen 30 Jahren verdreifacht und steigt jährlich um drei Millionen. Mit einem Rückgang der Verkehrsnachfrage auf dem Personenkraftverkehrssektor ist auch in den nächsten Jahren nicht zu rechnen. Während die Zentren durch steigende Verkehrsnachfrage immer mehr belastet werden, sind periphere Gebiete verkehrsinfrastrukturell deutlich benachteiligt. Der Europäischen Union droht dadurch „der Infarkt im Zentrum und die Lähmung an den Extremitäten“ [www-weissbuch].

Durch gezielte Verkehrsbeeinflussungs- und Verkehrsinfrastrukturmaßnahmen besteht die Hoffnung, trotz steigender Fahrzeugbestände, Verkehrsbelastungen zu kritischen Tageszeiten, in erster Linie während des Berufsverkehrs, aber auch zu saisonalen oder außergewöhnlichen Ereignissen, senken zu können. Der Verkehrstelematik wird zukünftig zur Verkehrsbeeinflussung eine eminente Bedeutung beigemessen. Verkehrstelematik ist ein Sammelbegriff für die Erfassung, Übertragung, Verarbeitung und Nutzung verkehrsbezogener Daten zur Organisation, Information und Lenkung des Verkehrs [Keller, 2001]. Telematiksysteme¹ beinhalten komplexe Hard- und Softwarekomponenten, die sich aus den Bereichen der Telekommunikation, Datenverarbeitung, Sensorik und Aktorik sowie den Algorithmen und Daten zusammensetzen [Keller, 2001].

Unter der Berücksichtigung zukünftiger technologischer Entwicklungen im Bereich der Telematikanwendungen wurden in jüngster Vergangenheit unterschiedliche Strategien der Verkehrsbeeinflussung entwickelt und Wirkungspotenziale abgeschätzt [Keller, 2001]. Die Maßnahmen zielen in drei Richtungen. Diese betreffen erstens die Verbesserung der Verkehrsmittelauslastung durch Erhöhung der Attraktivität öffentlicher Verkehrsmittel. In diesem Zusammenhang wird eine Priorisierung des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) an Lichtsignalanlagen (LSA) und Taktverdichtungen vorgeschlagen. Der zweite Bereich zielt in die optimierte Auslastung der Verkehrsinfrastruktur durch eine verbesserte Verteilung der Verkehrsströme im Verkehrsnetz und eine Erhöhung der Gleichmäßigkeit des Verkehrsflusses. Dazu sollen verstärkt neuartige Telematiksysteme zur verkehrsadaptiven Lichtsignalanlagensteuerung und zur dynamischen Zielführung bzw. zum Routing von Verkehrsteilnehmern, z. B. durch Fahrzeugnavigationssysteme oder elektronische Hinweisschilder, entwickelt und eingesetzt werden. Der dritte Maßnahmenkomplex sieht eine verbesserte Verknüpfung von Verkehrsträgern durch Telematikanwendungen vor. Die Auswirkungen der Maßnahmen werden letztendlich an den Reisezeiten der Verkehrsteilnehmer gemessen.

1. Telematiksysteme entsprechen im internationalen Sprachgebrauch Intelligent Transport Systems (ITS) [Keller, 2001]

Zur Senkung der Verkehrsbelastung hochfrequentierter innerstädtischer und interregionaler Verkehrsnetze existieren bereits verschiedene Telematikanwendungen. Die Endglieder dieser Anwendungen zur Regulierung des Straßenverkehrs sind Aktorik- und Verkehrsinformationssysteme. Aktoriksysteme geben konkrete Verhaltensvorschriften bzw. Handlungsanweisungen für jeden Verkehrsteilnehmer. Durch Aktoriksysteme werden Verkehrsströme direkt beeinflusst, Beispiele sind Lichtsignalanlagen oder elektronische Geschwindigkeitsanzeigen. Verkehrsinformationssysteme bieten dagegen Orientierungs- und Entscheidungshilfen für den Verkehrsteilnehmer. Sie können anhand von elektronischen Hinweisschildern oder Verkehrsnachrichten (RDS/TMC²) Auskünfte über die aktuelle Verkehrssituation bzw. Verkehrslage geben. GPS³-basierte Zielführungs- oder Routingsysteme sind mittlerweile eine etablierte Technologie, um einen Verkehrsteilnehmer über seine aktuelle Position im Straßenverkehrsnetz zu unterrichten und ihn zu seinem Zielort zu führen. Die Einbeziehung aktueller Verkehrsdaten zur Routenberechnung wird bei diesen Systemen in Zukunft eine große Rolle spielen.

Die Effizienz von Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen auf der Basis von Telematiksystemen ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Ein entscheidendes Kriterium ist die Verfügbarkeit aktueller Verkehrsdaten. Die Verkehrsdatenerhebung erfolgt heutzutage überwiegend automatisch mittels Sensoren. Je detaillierter das Verkehrsgeschehen über die Verkehrsdaten abgebildet wird, desto größer ist das Potenzial einer wirkungsvollen Verkehrsbeeinflussung im Sinne der Reisezeitminimierung. Aspekte der zeitlichen Datenauflösung und Datenaktualität, der räumlichen Datenverfügbarkeit, der messbaren Verkehrskenngrößen und deren Qualität sowie der Datenvergleichbarkeit von Messsystemen sind dabei maßgeblich. Die Anforderungen an die Daten werden dabei durch die jeweilige Verkehrsanwendung festgelegt.

Die heutigen Verfahren zur Verkehrsbeeinflussung sind größtenteils auf die Verarbeitung induktionsschleifenspezifischer Kenngrößen ausgelegt. Mit kleinen Erfassungsbereichen und den direkt messbaren Kenngrößen können Verkehrsprozesse in Straßenverkehrsnetzen jedoch nicht umfassend charakterisiert und beurteilt werden. Die Abbildung des Verkehrsgeschehens ist mit herkömmlichen Messmethoden aus den genannten Gründen unvollständig. Das Potenzial zur Verkehrsbeeinflussung mit Telematikanwendungen, die solche Messdaten verwenden, wird deshalb nicht ausgeschöpft.

Um die Effektivität der Verkehrsbeeinflussung zu erhöhen, müssen zusammenhängende Abschnitte des Verkehrsnetzes flächenhaft erfass- und auswertbar sein. In diesem Zusammenhang werden streckenbezogene Kenngrößen, z. B. die Verkehrsdichte oder Aufstelllängen vor Haltelinien an Lichtsignalanlagen, benötigt. Das Verkehrsgeschehen kann dadurch unter räumlichen und inhaltlichen Aspekten detaillierter charakterisiert und Verkehrsströme durch neue Verfahren gezielter beeinflusst werden [Mikat, 2003]. Solche Verfahren werden bereits in verschiedenen Telematiksystemen erprobt. Mit den derzeit verfügbaren Messsystemen können die erforderlichen Daten jedoch nicht oder nur begrenzt zur Verfügung gestellt werden.

2. Radio Data System / Traffic Message Channel

3. Global Positioning System

Opto-elektronische Flächensensoren sind, im Gegensatz zu anderen Sensoren, prinzipiell zur direkten Messung streckenbezogener Verkehrskenngrößen geeignet. Dieses Potenzial wird derzeit jedoch nicht oder nur eingeschränkt genutzt. Die Gründe liegen in erster Linie in der Problematik der Verkehrsobjektdetektion durch Bildverarbeitung und fehlenden Konzepten zur Einbindung in Telematiksysteme.

Die Verwendung bodengebundener opto-elektronischer Sensoren zur Auswertung größerer zusammenhängender Bereiche von Straßenverkehrsnetzen ist eine sehr komplexe Aufgabenstellung und erfordert entsprechend umfangreiche Arbeiten in der Konzeption und Entwicklung eines solchen Systems. Die Kopplung von Sensorik, Verkehrstelematik und geografischer Informationssysteme zu einem integrierten Gesamtsystem wird in diesem Zusammenhang als sinnvoll erachtet, da sie verschiedene Synergien beinhaltet. Zur Zeit gibt es keine operationell arbeitenden Messsysteme, die auf der Basis bodengebundener opto-elektronischer Flächensensoren streckenbezogene Verkehrsdaten in größeren Abschnitten von Verkehrsnetzen erheben und darüberhinaus mit Telematiksystemen oder mit geografischen Informationssystemen verknüpft sind. In diesen Punkten besteht offensichtlich Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Vor dem Hintergrund wachsender Verkehrsbelastungen erscheint eine integrierte Konzeption und Entwicklung eines Gesamtsystems zur adaptiven Verkehrsbeeinflussung auf der Basis opto-elektronischer Sensoren notwendig. Die interdisziplinäre Aufgabenstellung dieser Arbeit beinhaltet die Konzeption und Mitwirkung an der Umsetzung eines opto-elektronischen Messsystems zur Auswertung größerer zusammenhängender Straßenverkehrsbereiche. Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Verbundprojektes „Optische Informationssysteme für die Verkehrsszenenanalyse und Verkehrslenkung“ (OIS) am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) in Berlin-Adlershof. An diesem Projekt waren mehrere wissenschaftliche Einrichtungen sowie private Unternehmen beteiligt.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist Darstellung der prinzipiellen Vorgehensweise zur Analyse größerer Straßenverkehrsbereiche anhand verteilter hochverfügbarer bodengestützter opto-elektronischer Sensoren. Die Analyse und Einflussnahme des Straßenverkehrs basiert dabei auf zwei wesentlichen Grundgedanken. Der erste Aspekt beinhaltet die Auswertung größerer Bildausschnitte eines Sensors. Dadurch können größere zusammenhängende Bereiche des Straßenraums erfasst und streckenbezogene Verkehrskenngrößen, die für wirkungsvolle verkehrsadaptive Beeinflussungsmaßnahmen bedeutend sind, direkt gemessen werden. Durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Flächensensoren ist als zweiter wesentlicher Punkt die Größe des erfassbaren, zusammenhängenden Straßenraums skalierbar. Dadurch können Verkehrsdatenmodelle unterschiedlicher räumlicher Kategorien erzeugt werden. Das aktuelle Verkehrsgeschehen kann dadurch unter räumlichen und inhaltlichen Gesichtspunkten umfassender als mit herkömmlichen Messverfahren beschrieben werden. Die Hauptanwendung der Verkehrsdaten wird in der Verwendung zur Beeinflussung von Verkehrsströmen durch zukünftige Telematikanwendungen, die auf aktuelle streckenbezogene Verkehrsdaten angewiesen sind, gesehen. Zu Beginn der Ausführungen wird auf die Entwicklung von Verkehrsmesssystemen und dabei besonders auf opto-elektronische Sensorsysteme sowie deren Integration in Telematiksysteme eingegangen. Aus den einführenden Betrachtungen werden dann Anforderungen an ein opto-elektronisches Messsystem zur Erfassung streckenbezogener Verkehrsdaten formuliert. Anschließend wird ein Sensor- und Datenverarbeitungskonzept zur direkten Bestimmung streckenbezogener Verkehrskenngrößen aus den Sensordaten vorgestellt. Damit sollen konzeptionelle Grundlagen bezüglich des Aufbaus eines solchen Messsystems und der notwendigen Schritte zur Verarbeitung der Daten geschaffen werden. Das Datenverarbeitungskonzept beinhaltet eine von der Bilddatenaufnahme bis zur Darstellung von Verkehrsdaten durchgehende Datenverarbeitungskette. Die einzelnen Systemkomponenten sind in einem hierarchisch gegliederten Sensornetzwerk organisiert.

In Kapitel fünf wird auf die Arbeiten zur Umsetzung des Sensor- und Datenverarbeitungskonzepts eingegangen. In einem praktischen Teil werden die Ergebnisse zur Datenerhebung im Rahmen von Messkampagnen vorgestellt. Anschließend werden die Verarbeitungsschritte zur Auswertung der in den Experimenten erzeugten Daten erläutert. Die Schwerpunkte liegen dabei auf der Ableitung von Verkehrsdatenmodellen unterschiedlicher räumlicher Kategorien sowie der Vernetzung zwischen geografischen Informationssystemen (GIS) und der Sensorik. In diesen Punkten ergeben sich neue Aufgabenfelder im Bereich GIS, die Gegenstand dieser Arbeit sind. Sie können als Aufgaben zur Konfiguration von Prozessketten sowie zur Datendarstellung mittels GIS zusammengefasst werden. Die Dynamik der Straßenverkehrsprozesse erfordert im Zusammenhang der Datendarstellung mittels GIS eine besondere Berücksichtigung der Zeitkomponente. Abschließend wird auf verkehrsrelevante Anwendungen eingegangen, die von den in dieser Arbeit vorgestellten Verkehrskenngrößen partizipieren können.

2 Stand der Entwicklung

Zur Erfassung von Verkehrsdaten stehen mittlerweile unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Die Messsysteme können unter plattformspezifischen Gesichtspunkten in luft- und bodengestützte Systeme eingeteilt werden. In diesem Kapitel wird eine Auswahl an Messsystemen vorgestellt und auf ihre Besonderheiten sowie Vor- und Nachteile eingegangen.

2.1 Luftgestützte Verkehrsdatenerfassung

Der Straßenverkehr kann bei der luftgestützten Verkehrsdatenerhebung aufgrund des größeren Abstands zwischen Sensor und den abzubildenden Objekten prinzipiell großflächiger als mit bodengebundenen Systemen erfasst werden. Diese Aussage bezieht sich auf die Verwendung von Einzelsystemen, die nicht als Sensornetzwerk organisiert sind. In jüngster Vergangenheit wurden bereits einige Prototypen entwickelt und auf verschiedenen Plattformen, z. B. Flugzeug, Zeppelin oder Helikopter, erprobt. Je nach Plattform können diese Systeme den Straßenverkehr von stationären oder ortsveränderlichen Positionen aus beobachten. Die klassische Flug- und Aufnahmehöhe variiert dabei zwischen 500-3000m. Aufgrund der relativ senkrechten Blickwinkel und der geringen Fahrzeughöhen sind gegenseitige Fahrzeugverdeckung weniger kritisch als bei Schrägaufnahmen bodengebundener opto-elektronischer Messsysteme. Die Separierung einzelner Verkehrsobjekte durch die Bildverarbeitung ist deshalb einfacher.

Der Einsatz von Fernerkundungssystemen im operationellen, d. h. im dauerhaften Betrieb, wurde bisher nicht realisiert. Fernerkundungssysteme sind deshalb derzeit für die Verkehrsdatenerhebung von untergeordneter Bedeutung. Projektbeispiele zur flugzeuggestützten Verkehrsdatenerfassung mittels opto-elektronischer Flächensensoren sind LUMOS [www-Lumos] im thermischen Infrarot (TIR) und EYE IN THE SKY im visuellen Bereich des elektromagnetischen Spektrums [www-Eye in the sky]. Alternative Technologien, z. B. Radar (Synthetic Aperture Radar-SAR), wurden ebenfalls bezüglich ihrer Eignung zur Verkehrsdatenerhebung getestet [Voss, 2000], [Voss, 2003].

Das gesamte Verkehrsnetz einer Großstadt kann derzeit nicht gleichzeitig durch ein einzelnes luftgestütztes Fernerkundungssystem beobachtet werden. Eine flächendeckende, gleichzeitige Erfassung und Analyse des Verkehrsgeschehens in Großstädten ist deshalb aus der Luft nicht möglich.

2.2 Bodengebundene Verkehrsdatenerfassung

Die automatische Verkehrsdatenerhebung erfolgt heutzutage durch bodengestützte aktiv oder passiv arbeitende Messsysteme. Im Gegensatz zu luftgestützten Fernerkundungssystemen sind sie direkt im Straßenraum oder in dessen unmittelbarer Nähe ortsfest installiert. Der durch einen einzelnen Sensor erfassbare Straßenverkehrsraum ist aufgrund des wesentlich geringeren Abstands zu den Verkehrsobjekten kleiner als bei luftgestützten Systemen. Die Mehrzahl bodengebundener Verkehrsdatenerfassungssysteme ist auf die Erfassung von Verkehrskenngrößen an Straßenquerschnitten bzw. eng begrenzter Bereiche des Straßenraums, ausgelegt. Die Einschränkung der Erfassungsbereichsgröße ist sowohl messtechnisch als auch historisch bedingt. Die meisten Systeme orientieren sich in den zu berechnenden Kenngrößen an einem der ältesten und dem gleichzeitig am häufigsten verwendeten Verfahren zur Verkehrsdatenerfassung, der Induktionsschleife.

Die Anzahl der aus den Messdaten der Sensoren direkt ableitbaren Verkehrskenngrößen ist aufgrund der geringen Erfassungsbereichsgröße auf wenige Kenngrößen⁴ begrenzt. Mit einer geringen Erfassungsbereichsgröße kann allerdings eine Datenqualität sichergestellt werden, die den hohen Sicherheitsanforderungen von Aktoriksystemen, in erster Linie Lichtsignalanlagen, gerecht wird. Die Anforderungen beinhalten in diesem Zusammenhang die zuverlässige Detektion der Verkehrsteilnehmer bzw. Verkehrsobjekte durch die Sensoren, eine hohe zeitliche Auflösung und Datenaktualität. Herkömmliche bodengebundene Messsysteme zur Verkehrsdatenerhebung zeichnen sich durch die genannten Eigenschaften aus.

Eine Übersicht verfügbarer bodengebundener Messsysteme gibt [NIT PHASE II, 2002]. An dieser Stelle werden einige Verfahren vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf passiven opto-elektronischen Systeme.

2.2.1 Aktive Verfahren

Bei aktiven Messverfahren wird ein elektromagnetisches Feld (z. B. Induktionsschleife) oder eine elektromagnetische Strahlung (z. B. Radar) erzeugt und je nach Verfahren die Feldänderungen oder Reflektionen der Signale ausgewertet. Das älteste und nach wie vor gebräuchlichste automatische Verkehrsdatenerfassungssystem ist die Induktionsschleife. Sie besteht aus einer in die Fahrbahn eingelassenen Drahtschleife und einer Auswerteeinheit. In der Schleife wird ein elektromagnetisches Feld erzeugt, das beim Überfahren durch ein motorisiertes Kraftfahrzeug (KFZ) verändert wird. Anhand der Feldänderungen können einige wenige Verkehrskenngrößen, z. B. Länge, Geschwindigkeit, Abstand und Anzahl der Fahrzeuge, an Messquerschnitten ermittelt werden.

Induktionsschleifen zeichnen sich, unabhängig von veränderlichen Umweltbedingungen, durch eine gleichbleibend hohe Detektionszuverlässigkeit aus. Sie werden deshalb primär zur Steuerung von Lichtsignalanlagen verwendet. Herkömmliche Verfahren zur Lichtsignalanlagensteuerung beinhalten sowohl dynamische als auch statische Regelungskomponenten. Die verkehrsadaptive Steuerung ist in der Lage, auf spezielle verkehrliche Einzelereignisse dynamisch zu reagieren. Dazu werden von Induktionsschleifen erhobene Verkehrsdaten verwendet. Verbreitete Anwendungen sind die Grünzeitverlängerung⁵ und die Priorisierung des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV). Die Verkehrsbeeinflussung basiert damit bei diesem Teil der Lichtsignalanlagensteuerung auf Erkenntnissen bezüglich des aktuellen Verkehrszustandes. Bei dieser Konstellation wird eine Rückkopplung zwischen dem aktuellen Verkehrsgeschehen und der Verkehrstelematik erreicht. Allerdings ist die Kenntnis des aktuellen Verkehrszustands durch die geringe Erfassungsbereichsgröße einer Induktionsschleife und die geringe Anzahl an Verkehrskenngrößen deutlich eingeschränkt. Bei der statischen Regelungskomponente wird die aktuelle Verkehrslage über statistische Werte approximiert. Dazu werden historische und zeitlich aggregierte Daten bzw. Verkehrsstatistiken verwendet, die mit teilweise großer zeitlicher Verzögerung in die Verkehrsbeeinflussung einfließen. Die Beschreibung aktueller Verkehrszustände über historische und zeitlich aggregierte Verkehrskenngrößen ist jedoch ungenau, denn der Straßenverkehr ist ein sehr dynamisches und nur eingeschränkt vorhersagbares System. Anhand der Statistiken werden Phasenumlaufpläne⁶ erstellt, mit denen dann eine Festzeitsteuerung vorgenommen wird. Die Phasenumlaufzeiten können dabei im tageszeitlichen Verlauf variieren. Dadurch soll die Regelung an die tageszeitlichen Schwankungen der Verkehrsbelastung angepasst werden.

4. z. B. Anzahl, Geschwindigkeit, Anwesenheit, Abwesenheit, Zeitlücke

5. Verlängerung der Grünphase einer Fahrtrichtung bei Detektion eines Verkehrsobjekt durch die Sensorik

6. Kompletter Umlauf der Rot- und Grünphase aller Fahrtrichtungen

Je mehr die aktuelle Verkehrslage von der Verkehrsstatistik abweicht, desto uneffektiver ist die Wirkung der Steuerung. Der entscheidender Nachteil der Festzeitsteuerung ist die fehlende Rückkopplung zum aktuellen Verkehrsgeschehen. Sie ist deshalb im Prinzip nicht in der Lage, den aktuellen Verkehrszustand zu berücksichtigen. Die Festzeitsteuerung ist jedoch die primäre Komponente der Lichtsignalanlagensteuerung. Verkehrsadaptive Verfahren dienen dagegen lediglich als Ergänzung zur Festzeitsteuerung.

Aufgrund des hohen Aufwands bei der Installation in der Fahrbahndecke und den zusätzlichen Kosten bei Fahrbahnsanierungs- oder -erneuerungsmaßnahmen werden Induktionsschleifen jedoch allmählich durch andere Messverfahren ersetzt.

2.2.2 Passive opto-elektronische Verfahren

Bodengestützte passive opto-elektronische Messsysteme gewinnen zunehmend an Bedeutung für die Verkehrsdatenerfassung. Im Gegensatz zur klassischen Induktionsschleife sind opto-elektronische Messsysteme jedoch nicht von mechanischem Verschleiß betroffen. Aus dieser Eigenschaft resultieren einige Vorteile im Vergleich zur Induktionsschleife. Mechanische Verschleißerscheinungen, die durch den Kontakt zwischen KFZ und Induktionsschleife entstehen, werden vermieden. Außerdem entstehen keine zusätzlichen Kosten bei Arbeiten an der Fahrbahndecke. Die Mess- bzw. Verkehrsdatenerfassungsbereiche können bei opto-elektronischen Sensoren im Gegensatz zur Induktionsschleife immer wieder ohne größeren Aufwand in ihrer Position und Größe verändert werden. Außerdem kann prinzipiell sowohl der motorisierte als auch der nicht motorisierte Verkehr detektiert werden.

Das Messprinzip beruht auf der Aufnahme und anschließenden Auswertung der reflektierten oder emittierten elektromagnetischen Strahlung von Objekten. Dazu werden Sensoren eingesetzt, die im elektromagnetischen Spektrum des sichtbaren Lichts oder des thermischen Infrarot sensitiv sind. Bei VIS-Sensoren wird CCD⁷- oder CMOS⁸-Technologie verwendet. Im Bereich der TIR-Sensoren stehen mittlerweile unterschiedliche Technologien gekühlter und ungekühlter Bolometer zur Verfügung [Tissot, 2004]. In Abhängigkeit der photoempfindlichen Elemente werden Single- bzw. Einzeldetektoren und Flächensensoren unterschieden. Die Anzahl photoempfindlicher Elemente entscheidet in diesem Zusammenhang mit der Objektivbrennweite und dem Abstand zwischen dem Sensor und den Objekten über die Ortsauflösung und Größe des Abbildungs- und Auswertebereichs im Straßenverkehrsraum.

Mit Einzeldetektoren können lediglich Querschnittsmessungen durchgeführt und damit induktionsschleifenspezifische Verkehrskenngrößen erhoben werden. Im Gegensatz zu anderen bodengebundenen Messsystemen sind opto-elektronische Flächensensoren in der Lage, größere Bereiche des Straßenraums abzubilden. Sie sind deshalb prinzipiell zur flächenhaften Beobachtung des Straßenverkehrs und zur Messung streckenbezogener Verkehrskenngrößen geeignet [Leich, 2001]. Dieses Potenzial wird derzeit jedoch aufgrund von Problemen, die mit der Detektion der Verkehrsteilnehmer durch die Bildverarbeitung zusammenhängen, nur eingeschränkt genutzt.

7. Charged-Coupled Device

8. Complimentary Metal-Oxide Semiconductor

Messsysteme, bei denen Flächensensoren zum Einsatz kommen, werden auch als Videodetektionssysteme bezeichnet. In der Literatur existiert mittlerweile eine Vielzahl von Ansätzen zur automatischen Bilddatenauswertung. Das Spektrum umfasst Themen zur Objektextraktion, Objektverfolgung, Objektfusion, bis zum Design von Gesamtsystemen zur Verkehrsdatenerfassung mittels Videodetektion [Malik, 1997], [Beymer, 1998], [Dailey, 1999], [Reulke, 2002], [Schischmanow, 2003], [Schischmanow, 2004]. Solche Systeme sind durchaus in der Lage, größere Straßenbereiche abzubilden und streckenbezogene Verkehrskenngrößen zu messen. Die Überführung von Prototypen aus Forschung und Entwicklung in operationell einsetzbare Sensorsysteme und deren Verwendung für Echtzeit-Verkehrs Anwendungen wird jedoch durch die hohen verkehrstechnischen Anforderungen an die Detektionssicherheit erschwert. Die Entwicklung zuverlässiger Bildverarbeitungs Algorithmen zur Objektextraktion und Objektverfolgung ist dabei von zentraler Bedeutung. Wechselnde Beleuchtungs-, Witterungs-, und Verkehrsbedingungen sind für diverse bildverarbeitungsspezifische Probleme, z. B. (teil)verdeckte Objekte [Frank, 1996], verantwortlich. Die „Eierlegende Wollmilchsau“ in Form eines einzigen Algorithmus zur Verkehrsobjektdetektion bei unterschiedlichsten Umweltbedingungen wird es wahrscheinlich zukünftig nicht geben. Es ist davon auszugehen, dass bei der Beobachtung größerer Straßenverkehrsbereiche durch ein opto-elektronisches System Verkehrsobjekte teilweise nicht detektiert werden. Daraus resultiert eine unvollständige Abbildung des aktuellen Verkehrszustands. Telematiksysteme müssen deshalb auch mit unvollständigen oder fehlerhaften Datensätzen umgehen können.

Kommerzielle operationell einsetzbare Videodetektionssysteme bilden aus den o. g. Gründen normalerweise in der Erfassungsbereichsgröße kleinere Straßenausschnitte innerhalb virtueller Schleifen, die auch als Regions of Interest (ROI) bezeichnet werden, nach. Die Anzahl direkt messbarer Kenngrößen ist dementsprechend begrenzt. Die Datenauswertung basiert bei diesen Systemen größtenteils auf monokularen Bildfolgen.

Die abgeleiteten Verkehrskenngrößen werden zusammen mit den Erfassungsbereichen zwar räumlich in Beziehung gestellt, z. B. Verkehrsknoten *A*, Fahrspur *B*, Erfassungsbereich *C*. Eine Verortung der Daten im geografisch-räumlichen Sinne in Form von Welt- bzw. Objektkoordinaten wird dagegen selten angeboten. Dieser Bezug wäre aber Voraussetzung zur Erstellung gesamtstädtischer Verkehrsmodelle aus den Daten einzelner Sensorsysteme und deren Integration mit geografischen Informationssystemen. Diese Aspekte sind für übergeordnete koordinierte Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen von großer Bedeutung.

Die Einsatzbereiche passiver opto-elektronischer Messsysteme sind sehr vielfältig. Ungekühlte TIR-Sensoren kommen z. B. als Singledetektoren in dem kommerziellen Verkehrsnachrichtendienst TEGARON zum Einsatz. Die ca. 3000 Sensoren sind über das gesamte deutsche Autobahnnetz verteilt. Durch das Messsystem werden Daten und Informationen bezüglich der Verkehrslage abgeleitet und primär für Routingapplikationen verwendet. Videodetektionssysteme kommen im operationellen und nicht operationellen Bereich im Zusammenhang mit Verkehrs- und Raumplanungsaufgaben zum Einsatz.

Durch Untersuchungen ist die gute bis sehr gute Zuverlässigkeit kommerzieller Videodetektionssysteme bei Verkehrszählungen und Geschwindigkeitsmessungen belegt [NIT PHASE II, 2002]. Im Vergleich zur Induktionsschleife beträgt die Abweichung bei der Messung von Geschwindigkeiten und der Fahrzeuganzahl je nach System ca. 1% bis <10% [NIT PHASE II, 2002]. Das bedeutet eine mindestens 90 prozentige Detektionssicherheit herkömmlicher opto-elektronischer Flächensensoren bei Querschnittsmessungen. Der Einsatz kommerzieller video-gestützter Messsysteme zur verkehrsabhängigen Steuerung von Verkehrsknoten- und Netzen ist damit prinzipiell denkbar, wird derzeit jedoch nicht vorgenommen [Tsatalpasidis, 2000].

2.2.3 Sonstige Verfahren

Neue Verfahren zur Verkehrsbeeinflussung durch Telematikanwendungen sind auf streckenbezogene Verkehrskenngrößen angewiesen. Diese Daten sind mit den derzeit zur Verfügung stehenden Sensorsystemen jedoch nicht direkt messbar. Aus diesem Grund wurden Methoden zur Extrapolation messquerschnittsbezogener Verkehrsdaten entwickelt. BALANCE ist ein Verfahren, bei dem durch Auswertung der Induktionsschleifensignale indirekt auf die Aufstelllänge vor Lichtsignalanlagen extrapoliert wird [Mück, 2002], [Mück, 2003]. Die Längen der Grün- und Rotphasen der Lichtsignalanlagen wird auf Basis der extrapolierten Aufstelllängen dynamisch angepasst. Außerdem gibt es Untersuchungen zum Einsatz satellitengestützter Verkehrsdatenerfassungssysteme mittels GPS [www-Multisat]. In dem Projekt Floating Car Data (FCD) wird auf Verkehrszustände im Umfeld von Einzelfahrzeugen aus deren GPS-Aufzeichnungen geschlossen [Schäfer, 2003]. Dazu werden Flotten mit GPS-Empfängern ausgestattet. Die Signale werden an eine Zentrale weitergeleitet und dort ausgewertet. Auf Basis von FCD-Daten werden mittlerweile Mobilitätsdienste auf unterschiedlichen Plattformen, z. B. Verkehrslagedarstellung und dynamische Routenplanung im Internet [www-CityRouter] erprobt. Die Daten werden weiterhin für Verkehrsnachrichten z. B. Radio (RDS-TMC) oder Videotext, aber auch für die Beantwortung urbaner Fragestellungen⁹ verwendet [Lorkowski, 2003].

Die Ermittlung streckenbezogener Verkehrskenngrößen durch Extrapolation punkthafter Messdaten und die Schlussfolgerungen bezüglich aktueller Verkehrszustände ist jedoch mit gewissen Fehlertoleranzen und Unsicherheiten verbunden. Die mit BALANCE ermittelten Staulängen weichen durchaus von den tatsächlichen Werten ab. Im Fall von Floating Car Data kann die Interpretation bestimmter Daten darüberhinaus zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen führen. Es ist beispielsweise nicht möglich zu unterscheiden, ob sich ein Fahrzeug im Stau befindet oder ob der Fahrer z. B. auf Kundschaft wartet. Durch direkte Messung streckenbezogener Verkehrskenngrößen mittels opto-elektronischer Flächensensoren könnten solche mehrdeutigen Interpretationen vermieden werden.

9. z. B. Modellierung von Emissionsbelastungen [Schäfer, 2003]

2.3 Geografische Informationssysteme

Der Bedarf zur Aufbereitung, Darstellung und Analyse aktueller oder archivierter Verkehrsdaten steigt ständig. Geografischen Informationssystemen wird in diesem Zusammenhang eine zunehmende Bedeutung beigemessen. Diese Systeme werden allgemein zur Visualisierung und Analyse geografischer Daten mit Raumbezug verwendet. Sie umfassen ein vielfältiges Anwendungsspektrum, so auch den Bereich Straßenverkehr. [Zagel, 2000] gibt eine Übersicht zum aktuellen Stand der Entwicklung von Verkehrs-GIS.

GIS-bezogene Verkehrsanwendungen zur Darstellung und Auswertung der im Rahmen von Sensoren erzeugten Verkehrsdaten sind einerseits Spezialanwendungen, d. h. unabhängig von herkömmlicher GIS-Technologie entwickelte Systeme. Beispiele sind Verkehrsinformationssysteme zur Routenplanung und Zielführungs unterschiedlicher Plattformen¹⁰ Andererseits handelt es sich um Anwendungen auf der Basis klassischer GIS-Technologie.

Während die erste Kategorie auf die Verarbeitung aktueller Verkehrsdaten mit einer geringen zeitlich-räumlichen Persistenz ausgerichtet sind, können herkömmliche GIS mit solchen Daten i. d. R. nicht oder nur sehr eingeschränkt operieren.

Der überwiegende Anteil internetbasierter Verkehrsinformationssysteme bezieht die erforderlichen Verkehrsdaten aus klassischen Messverfahren, allen voran der Induktionsschleife. Anwendungsbeispiele sind [www-LoopClient], [www-TrafNet], [www-VerkehrWien] und [www-NRW]. Seit kurzem werden allerdings auch Daten alternativer Verkehrsdatenerfassungssysteme, z. B. FCD-Daten [www-CityRouter], in Mobilitätsdiensten eingesetzt. Es ist davon auszugehen, dass in zukünftigen Entwicklungsprogrammen Algorithmen und Konzepte zur Datenverknüpfung unterschiedlicher Sensorsysteme und deren Integration in Telematiksystemen umgesetzt werden [Dailey, 1996].

Zur Abbildung zeitlich-räumlich hoch dynamischer Prozesse innerhalb herkömmlicher GIS wurde die Forschungs- und Entwicklungsarbeit erst in jüngster Vergangenheit stärker vorangetrieben. In der Literatur finden sich nur vereinzelt Angaben zur Verknüpfung von Sensorsystemen zur Verkehrsdatenerhebung und herkömmlichen GIS. Ein Grundstein zur Entwicklung echtzeitfähiger und interoperabler GIS-Funktionalitäten zur Visualisierung und Analyse dynamischer Verkehrsdaten innerhalb eines kommerziellen GIS wurde in dem Projekt OSIRIS gelegt [Valsecchi, 1999]. Mit der Entwicklung eines Prototypen wurde eine Verarbeitungskette zur Verkehrsdatenprozessierung und -analyse innerhalb GIS realisiert. Dabei fließen allerdings bereits zeitlich aggregierte Daten bzw. Statistiken, in das GIS ein. Zur Bewertung der dynamischen Prozesse im Straßenverkehr ist insgesamt eine 4D-Analyse und -Darstellung der Daten unterschiedlicher Informationsebenen, d. h. mikroskopisch bis makroskopisch, sinnvoll. Zur 4D-Abbildung mikroskopischer Verkehrsdaten, d. h. auf Einzelfahrzeugebene, innerhalb kommerzieller GIS wurden keine Angaben gefunden. Solche Darstellungen sind lediglich aus Spezialentwicklungen, z. B. in mikroskopischen Verkehrssimulationen¹¹, bekannt.

Der Vernetzung fachübergreifender statischer und dynamischer Daten in GIS wird ebenfalls zunehmend Bedeutung beigemessen [Valsecchi, 1999]. Die mittels Verkehrsmesssystemen erhobenen Daten können prinzipiell mit anderen räumlichen Daten innerhalb GIS verknüpft und für Forschungs- und Planungsaufgaben, z. B. zur Verkehrs- und Raumplanung, verwendet werden.

10. Internet, Fahrerassistenz

11. Projekt Simulation Of Urban Mobility (SUMO) [Krajzewicz, 2002]

In dem bereits erwähnten Projekt OSIRIS wird auf das Nutzungspotenzial der Datenverknüpfung dynamischer Verkehrsdaten mit anderen statischen Daten in einem urbanen Informationssystem hingewiesen [Valsecchi, 1999]. Das Projekt ILUMASS (Integrated Land-Use Modelling And Transportation System Modelling) ist ein konkretes Beispiel für multidisziplinäre urbane GIS-Anwendungen. Das Projekt beschäftigt sich mit Wechselwirkungen zwischen dem Mobilitätsverhalten und der innerstädtischen Flächennutzung. Das Ziel besteht in der Verbesserung der Methodik und Vereinheitlichung der Handlungsweise zur langfristigen Planung von Städten und Verkehrswesen durch ein mikroskopisch-dynamisches Verkehrs- und Flächenplanungsinstrument [Strauch, 2002].

Die Einbindung interaktiver GIS-Funktionalitäten in Videodetektionssystemen ist normalerweise sehr eingeschränkt. Dabei handelt es sich z. B. um Funktionen zur Konfiguration von Erfassungsbereichen oder zur Koordinaten- und Streckenmessung in den Bilddaten [www-ViVATraffic]. Letzteres ermöglicht nachträglich eine manuelle Ableitung bestimmter Verkehrskenngrößen und Bewertung von Verkehrssituationen.

Zur Realisierung neuartiger GIS-Funktionen innerhalb kommerzieller GIS stehen in erster Linie GIS-interne Programmiersprachen zur Verfügung. Die Vernetzungen kommerzieller GIS-Technologie und externer Soft- und Hardware ist aufgrund der Kapselung von GIS schwierig. Einzelne GIS-Funktionen können deshalb auch nur begrenzt für eigene Anwendungen verwendet werden [Matheja, 2000]. Heutige GIS erfüllen insgesamt nicht die an sie gestellten Aufgaben zum Management von Echtzeit-Daten [Claramunt, 2000].

2.4 Konsequenzen

Großstädtische Straßenverkehrsnetze können derzeit operationell mit einem einzelnen Sensor nicht flächendeckend erfasst werden. Die Erhebung von Verkehrsdaten erfolgt deshalb punktuell durch stationäre oder ortsveränderliche bzw. dynamische Messsysteme. Das Verkehrsgeschehens kann mit der etablierten Mess- und Auswertetechnik unter räumlichen und inhaltlichen Aspekten, von einem einzelnen Verkehrsknoten bis zum gesamten Verkehrsnetz urbaner Gebiete, nur fragmentarisch abgebildet werden. Die Verkehrsbeeinflussung durch Telematiksysteme stützt sich erstens auf aktuelle Verkehrsdaten, die innerhalb kleiner Erfassungsbereiche erhoben werden, zweitens auf die räumliche Extrapolation von Verkehrsdaten und drittens auf statistische Kenngrößen. Die heutigen Steuerprogramme von Lichtsignalanlagen sind zwar auf diese Daten ausgerichtet, das Potenzial der Verkehrsbeeinflussung wird allerdings nicht ausgeschöpft.

Eine flächendeckende Beobachtung und Auswertung des Straßenverkehrsgeschehens wird mit bodengebundenen opto-elektronischen Messsystemen auch zukünftig nicht realisierbar sein. Allerdings können durch die Auswertung größerer zusammenhängender Ausschnitte des Verkehrsnetzes streckenbezogene Verkehrskenngrößen direkt gemessen und für neuartige verkehrsadaptive Methoden zur Verkehrsbeeinflussung genutzt werden. Mit opto-elektronischen Sensoren sind solche Kenngrößen prinzipiell messbar. Derzeit verfügbare „Videodetektionssysteme“ nutzen dieses Potenzial jedoch nicht aus. Die Kopplung solcher Sensoren mit Telematikanwendungen und mit Geografischen Informationssystemen zu einem integrierten Gesamtsystem ist ebenfalls bisher unzureichend betrachtet worden.

Der in diesem Kapitel dargestellte Entwicklungsstand bildet die Grundlage für die nachfolgenden Betrachtungen bezüglich der Anforderungen an ein ideales opto-elektronisches System zur Verkehrsdatenerhebung.

3 Anforderungen an ein ideales passives opto-elektronisches Sensorsystem

In Anlehnung an die einleitenden Betrachtungen können Anforderungen an ein ideales passives opto-elektronisches Sensorsystem zur bodengestützten Verkehrsdatenerfassung formuliert werden. Diese Anforderungen sind mit der Maßgabe verknüpft, Verkehrsdaten für ein breites Spektrum unterschiedlicher Verkehrsanwendungen zu generieren. Primäre Anwendungen sind Aktorik- und Verkehrsinformationssysteme zur Beeinflussung innerstädtischer Verkehrsnetze. Die mit dem Messsystem erhobenen Daten sollen aber auch zur Bearbeitung multidisziplinärer Fragestellungen mit Verkehrsbezug aus den Bereichen Entwicklung, Forschung und Planung verwendbar sein. Die übergeordnete Aufgabenstellung besteht deshalb in der großflächigen, möglichst umfassenden und realitätsnahen Abbildung des Straßenverkehrsgeschehens durch ein solches System unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen herkömmlicher und zukünftiger Telematikanwendungen. In den folgenden Ausführungen werden unter verschiedenen Gesichtspunkten wesentliche Anforderungen an ein ideales Messsystem, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit, betrachtet. Es soll jedoch gezeigt werden, dass bereits die Auswahl bestimmter Themen die Komplexität eines solchen Systems erkennen lässt.

Zur Umsetzung der Zielstellung, streckenbezogene Verkehrskenngrößen aus den Bilddaten opto-elektronischer Sensoren abzuleiten und sie für Verkehrsanwendungen bereitzustellen, sind eine Reihe unterschiedlichster Datenverarbeitungsschritte notwendig. Die Berechnung der Verkehrskenngrößen ist dabei einer der letzten Schritte innerhalb einer komplexen Datenverarbeitungskette, die mit der Bilddatenaufnahme durch die Sensoren beginnt und mit der Bereitstellung der Daten für Verkehrsanwendungen endet. Auf jeder Datenverarbeitungsstufe sind spezifische Verarbeitungsoperationen notwendig. Die einzelnen Algorithmen der Datenverarbeitungskette müssen deshalb aufeinander aufgebaut und abgestimmt werden. Die Datenverarbeitungsmodule müssen so ausgelegt werden, dass sie die gestellten Aufgaben erfüllen und sie gleichzeitig den Anforderungen der Verkehrsanwendungen an die Echtzeitfähigkeit des Messsystems gerecht werden.

3.1 Skalierbarkeit

Ein ideales opto-elektronische Messsystem muss unter verschiedenen Gesichtspunkten skalierbar sein. Mit einzelnen, stationären bodengebundenen Sensoren sind lediglich kleinere Ausschnitte des Verkehrsnetzes erfassbar. Die Anzahl der Sensoren muss der Größe des Verkehrsnetzes und der angestrebten Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung angepasst und damit variabel sein. Die Anzahl der Erfassungsbereiche innerhalb des Abbildungsbereichs eines einzelnen Sensors und die abzuleitenden Verkehrskenngrößen sollen ebenfalls skalierbar sein. Um aktuelle Verkehrsdaten für unterschiedliche Verkehrsanwendungen zu erzeugen, müssen Datenmodelle unterschiedlicher räumlicher Maßstäbe, von einem einzelnen Sensor, über einen Verkehrsknoten bis auf gesamtstädtischer Ebene erstellt werden. Unter räumlichen Gesichtspunkt ist demnach ebenfalls eine Skalierung erforderlich. Als Datenmodell wird in diesem Zusammenhang die Summe der Daten bezeichnet, die in einem definierten geografischen Raum durch ein oder mehrere Messsysteme erzeugt worden sind. Weitere Aspekte beinhalten die Anforderungen an die zeitliche Datenauflösung und an die Verkehrskenngrößen. Ein ideales opto-elektronische Messsystem muss auch in diesen Punkten skalierbar sein.

3.2 Datenaktualität

Die Anforderungen an die Datenaktualität sind je nach Verkehrsanwendung sehr unterschiedlich. Die Anwendung mit den höchsten Anforderungen muss in diesem Punkt bei der Konzeption eines Verkehrsdatenerfassungssystems als Maßstab verwendet werden. Die zeitkritischsten Anwendungen sind Telematiksysteme, die auf aktuelle Verkehrszustände dynamisch reagieren. Sie benötigen dazu aktuelle Verkehrsdaten. Die Online-Verarbeitung der Sensordaten und die Vernetzung von Sensorik mit diesen Verkehrsanwendungen sind deshalb wesentliche Voraussetzungen für eine wirkungsvolle Verkehrsbeeinflussung. Die Erfassung eines verkehrlichen Ereignisses durch die Sensorik und die Einflussnahme durch die Aktorik oder das Verkehrsinformationssystem muss sich in einem zeitlichen Rahmen vollziehen, in dem die gewünschte Wirkung erzielt werden kann. Dieses Kriterium definiert die Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit des Messsystems. Echtzeitfähigkeit ist demnach auf die jeweilige Aufgabenstellung bezogen. Die Anforderungen bezüglich Echtzeitfähigkeit können mit den Aufgaben, die von den Algorithmen zur Umsetzung erforderlich sind, in Konflikt geraten. Je komplexer das System und je höher die Echtzeitanforderung, desto schwerer ist eine Abschätzung im Vorfeld der Umsetzung, ob diese Vorgaben mit der verfügbaren Hard- und Software erfüllbar sind. Aus diesem Grund ist die Realisierbarkeit der Anforderungen im Punkt der Echtzeitfähigkeit nicht mit absoluter Sicherheit vorhersagbar.

Praktische Beispiele, mit denen die Forderung nach aktuellen Daten und Echtzeitfähigkeit unterstrichen werden können, finden sich sowohl aus dem Bereich der Aktorik als auch der Verkehrsinformationssysteme. Ein nachvollziehbares Beispiel ist die bereits erwähnte Grünzeitverlängerung an Lichtsignalanlagen. Bevor das Steuerprogramm einer Lichtsignalanlage die Rotphase einleitet, muss gewährleistet sein, dass ein Verkehrsteilnehmer, der sich einem Verkehrsknoten nähert, noch rechtzeitig angemeldet wird. Die Entscheidung bezüglich der Phasenverlängerung muss in 0.5-1 Sekunde getroffen werden. Von der Detektion am Sensor über die Datenauswertung bis zur Datenübertragung zum LSA-Steuergerät steht damit nur eine geringe Zeitspanne zur Verfügung. Mit diesem Wert ist gleichzeitig die Anforderung an die Datenaktualität eines idealen opto-elektronischen Messsystems definiert.

Im Fall der Verkehrsinformationssysteme muss der Verkehrsteilnehmer rechtzeitig über Verkehrszustände¹² informiert werden, die seine Ankunft am Zielort in einem größeren Umfang verzögern könnten. Der Verkehrsteilnehmer kann zu einem Zeitpunkt über die zu erwartende Verkehrssituation an einem bestimmten Ort informiert werden, zu dem er im Vergleich mit einer Lichtsignalanlage noch einen relativ großen Zeithorizont hat, um entsprechend zu reagieren. Die Anforderungen an die Datenaktualität sind deshalb im Bereich der Verkehrsinformationssysteme geringer als bei Lichtsignalanlagen. Aktoriksysteme, respektive LSA, sind die Anwendungen mit den höchsten Anforderungen an die Datenaktualität, Datensicherheit und Echtzeitfähigkeit, Abb.1. Ein ideales opto-elektronisches Verkehrsdatenerfassungssystem muss deshalb der Anforderung, aktuelle Messdaten im Subsekunden- bis Sekundenbereich zur Verfügung zu stellen, gerecht werden.

12. z. B. dichter Verkehr, Stau

Bei anderen Aufgabenstellungen mit verkehrlichem Bezug werden häufig statistische Größen benötigt. Die Echtzeitfähigkeit des Messsystems spielt hier keine Rolle. Die Daten sollten jedoch das Maß an Aktualität aufweisen, das für die jeweilige Aufgabenstellung erforderlich ist. Die benötigten Verkehrsdaten können dabei auch nachträglich im Offline-Datenverarbeitungsbetrieb durch geeignete Software prozessiert und bereitgestellt werden. Letzteres erfordert die Archivierung von Verkehrsdaten. Die Anforderungen an die Datenaktualität und damit Echtzeitfähigkeit des Messsystems sind damit insgesamt je nach Verkehrsanwendung sehr unterschiedlich.

3.3 Zeitliche Datenauflösung

Der zweite Zeitaspekt betrifft die zeitliche Datenauflösung. Die Dimensionierung erfolgt einerseits auf Basis der Verkehrsanwendung mit den höchsten Vorgaben an die zeitliche Datenauflösung und der Restriktionen bezüglich der Realisierbarkeit des Systems unter Echtzeitaspekten. Die Vorgaben unterliegen jedoch darüberhinaus datenverarbeitungsspezifischen Kriterien. Ein anschauliches Beispiel ist die sensornahe Datenverarbeitung. Um ein Verkehrsobjekt während seiner Anwesenheit im Abbildungsbereich des Sensors zu verfolgen, wird eine Taktzeit bzw. Bildaufnahmefrequenz von 5-6Hz empfohlen. Diese Festlegung beruht auf der Annahme, dass sich Verkehrsobjekte in innerstädtischen Bereichen durchschnittlich nicht schneller als mit 70km/h bzw. 19.5m/s bewegen. Bei dieser Geschwindigkeit und einer Taktzeit von 5Hz fährt ein Verkehrsobjekt zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten $<4\text{m}$. Bei einer mittleren PKW-Länge $>4\text{m}$ kann davon ausgegangen werden, dass das Verkehrsobjekt, unabhängig von seiner Position und Bewegungsrichtung zum Sensor, in zeitlich aufeinanderfolgenden Bildern, partiell in den gleichen Bildbereichen abgebildet wird. Die partielle Überdeckung des Verkehrsobjekts in aufeinanderfolgenden Bildern erleichtert das Wiederfinden des Objekts im zeitlichen Verlauf bzw. das Verkehrsobjekttracking wesentlich. LSA-Steuergeräte erwarten dagegen Daten von 1-2Hz. Die Anforderungen der messsysteminternen Verarbeitungsoperationen an die zeitliche Datenauflösung sind damit bei der sensornahen Datenverarbeitung höher als von der Aktorik gefordert und deshalb im Systemkonzept zu berücksichtigen.

Die Anforderungen unterschiedlicher Verkehrsanwendungen an die zeitliche Datenauflösung sind sehr verschieden, Abb.1. Zeitlich hoch aufgelöste Daten sollten deshalb in verschiedenen Intervallen, von einer Minute bis 24 Stunden, immer weiter zusammengefasst werden. Dadurch müssen zeitlich höher aufgelöste Daten nicht dauerhaft vorgehalten werden. Ein willkommener und zugleich notwendiger Effekt der Datenaggregation besteht in der Entlastung der Rechen- und Datenmanagementressourcen. Das Zeitschema zur Datenaggregation ist bei herkömmlichen Messsystemen normalerweise fest vorgegeben. Zur Entwicklung neuer LSA-Steuralgorithmen ist jedoch eine zeitlich dynamische, phasenumlaufbezogene Datenaggregation sinnvoll. Das erfordert den Zugang des Messsystems zur LSA-Zeitsteuerung sowie eine einheitliche Zeitbasis für das Messsystem und die Aktorik.

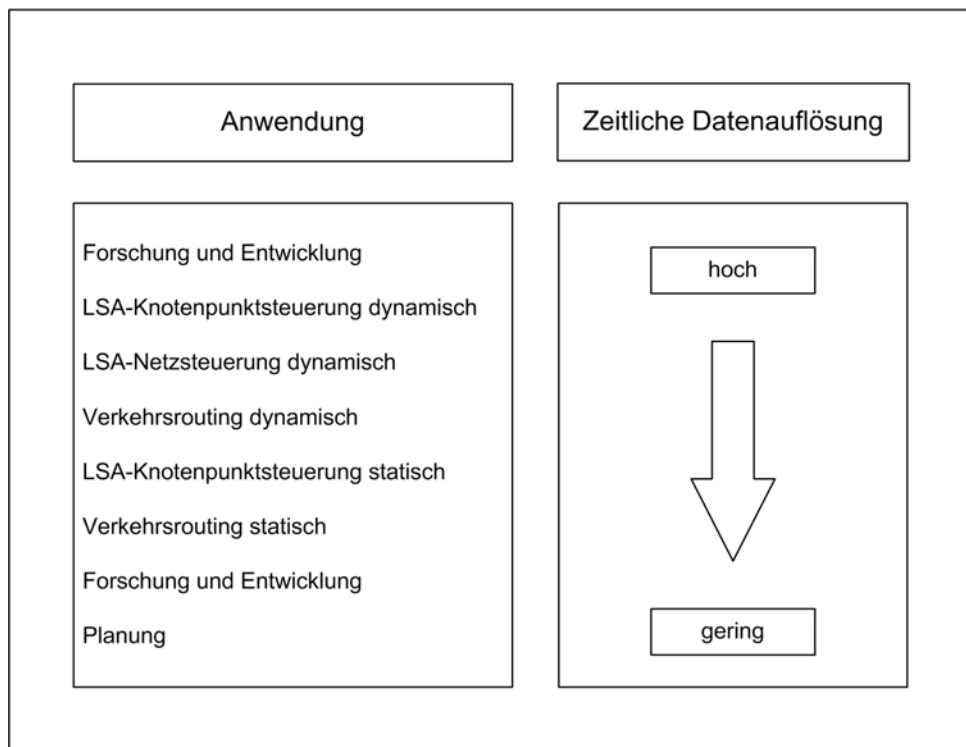


Abb. 1 Anforderungen verschiedener Verkehrsanwendungen an die zeitliche Datenauflösung, Beispiel

3.4 Räumliche Datenverfügbarkeit

Das Themengebiet der räumlichen Datenverfügbarkeit beinhaltet weitere wichtige Anforderungen an ein ideales opto-elektronisches Messsystem zur Verkehrsdatenerfassung. Sie betreffen die Ausdehnung der zu beobachtenden Bereiche des Straßenverkehrsraums sowie das räumliche bzw. geometrische Auflösungsvermögen der Sensoren. Diese Anforderungen haben Auswirkungen auf die Festlegung der geometrischen Eigenschaften des Sensors, dessen Abstand und Blickrichtung zum Straßenraum sowie die benötigte Anzahl der Sensoren und deren Verteilung im Verkehrsnetz.

Verkehrsknoten sind neuralgische Punkte im Straßenraum innerstädtischer Verkehrsnetze. Der Verkehr wird in diesen Bereichen zusammengeführt und wieder verteilt. Die Überschneidungen der Fahrtrichtungen an Knotenpunkten führen zwangsläufig zu einer Verminderung des Verkehrsflusses im Netz. Die unterschiedlichen Interessen einzelner Verkehrsteilnehmer¹³ bezüglich der Bewegungsrichtung, der Geschwindigkeit und des Verkehrsraums, den sie für sich in Anspruch nehmen, bergen zudem ein hohes Konfliktpotenzial. Im innerstädtischen Bereich konzentriert sich die Datenerhebung durch Sensoren deshalb an Verkehrsknoten sowie deren Umfeld. Die Daten werden hauptsächlich zur Steuerung von Lichtsignalanlagen verwendet. Die Anforderungen an die Größe und Position des zu beobachtenden Verkehrsraums an Knotenpunkten werden damit primär durch die Belange der LSA-Steuerung und der damit verbundenen Verkehrskenngrößen bestimmt. Das Augenmerk der an die räumliche Datenverfügbarkeit zu stellenden Anforderungen liegt einerseits auf herkömmlichen Steueralgorithmen.

13. motorisierter und nicht motorisierter Verkehr, ÖPNV und Individualverkehr

Auf der anderen Seite sollen Entwicklungen im Bereich zukünftiger Regelungsstrategien berücksichtigt werden. Um beiden Aspekten gerecht zu werden, ist die Messung sowohl querschnitts- als auch streckenbezogener Verkehrskenngrößen notwendig. Das erfordert die Beobachtung und Auswertung größerer zusammenhängender Straßenbereiche durch das Sensorsystem.

Der Verkehrsknoten selbst soll durch die Sensorik vollständig erfasst werden. Für die LSA-Regelung an einem einzelnen Knotenpunkt ist der Zuflussbereich maßgeblich. Das Sensorsystem soll in der Lage sein, den Zufluss bis 120m hinter der Haltelinie und den Abfluss hinter dem Verkehrsknoten bis 20m zu erfassen [Dalaff, 2002], Tab.6 im Anhang. Die gleichzeitige Auswertung der Zu- und Abflussbereiche im weiteren Umfeld des Verkehrsknotens ermöglicht auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen, von der einzelnen Lichtsignalanlage bis hin zur Netzsteuerung, die Berücksichtigung neuartiger Aspekte der Verkehrsbeeinflussung.

Die o. g. Anforderungen an die Größe des zu beobachtenden Verkehrsraums sind zusammen mit den örtlichen Gegebenheiten wichtige Punkte, die bei der Dimensionierung des Messsystems an einem Verkehrsknoten berücksichtigt werden müssen. Diese beinhalten Fragestellungen der Abbildungsverhältnisse am Sensor und damit verbunden die Anzahl der Sensoren an einem Verkehrsknoten.

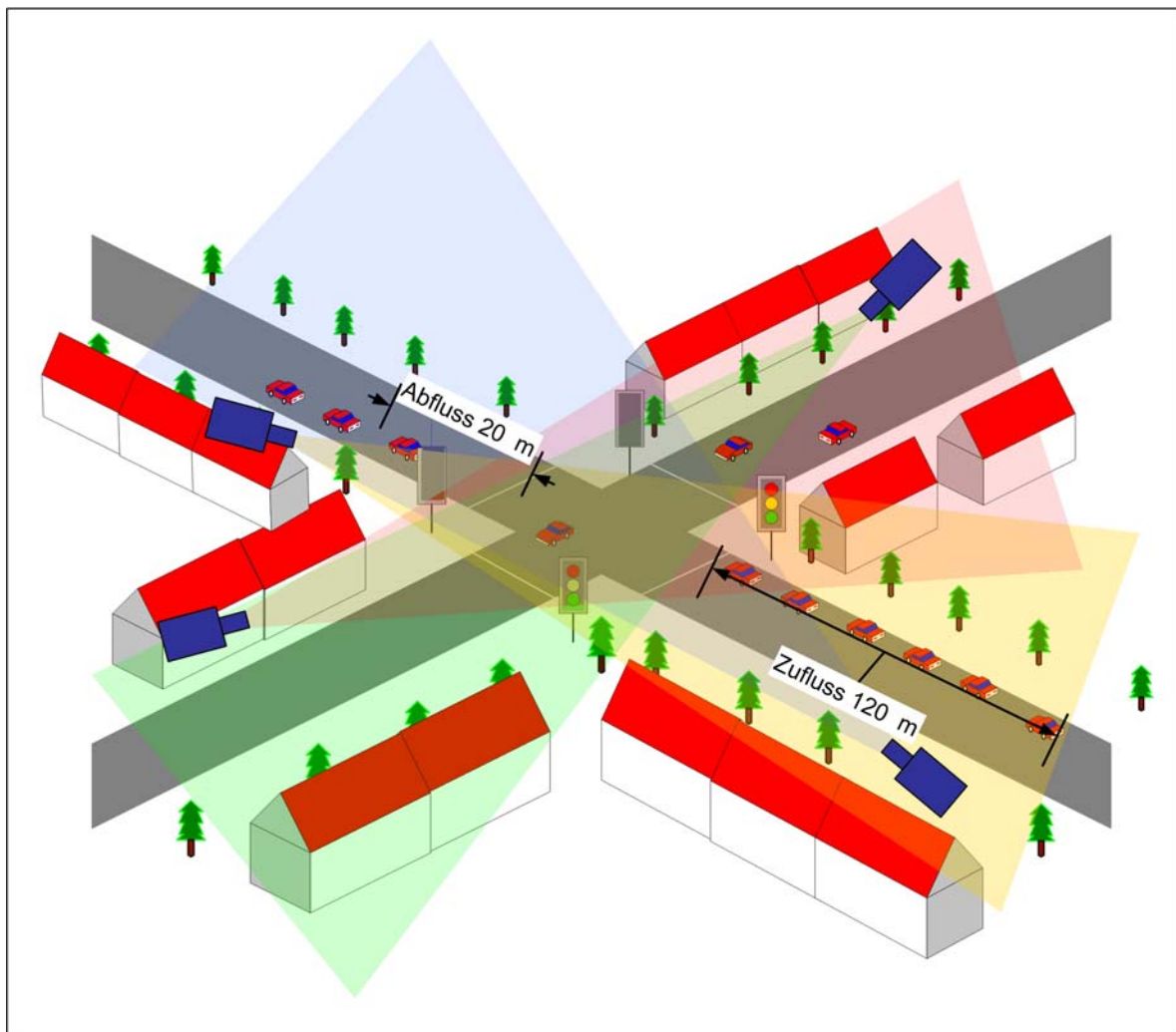


Abb. 2 Sensoranordnung an einem Verkehrsknoten, Beispiel

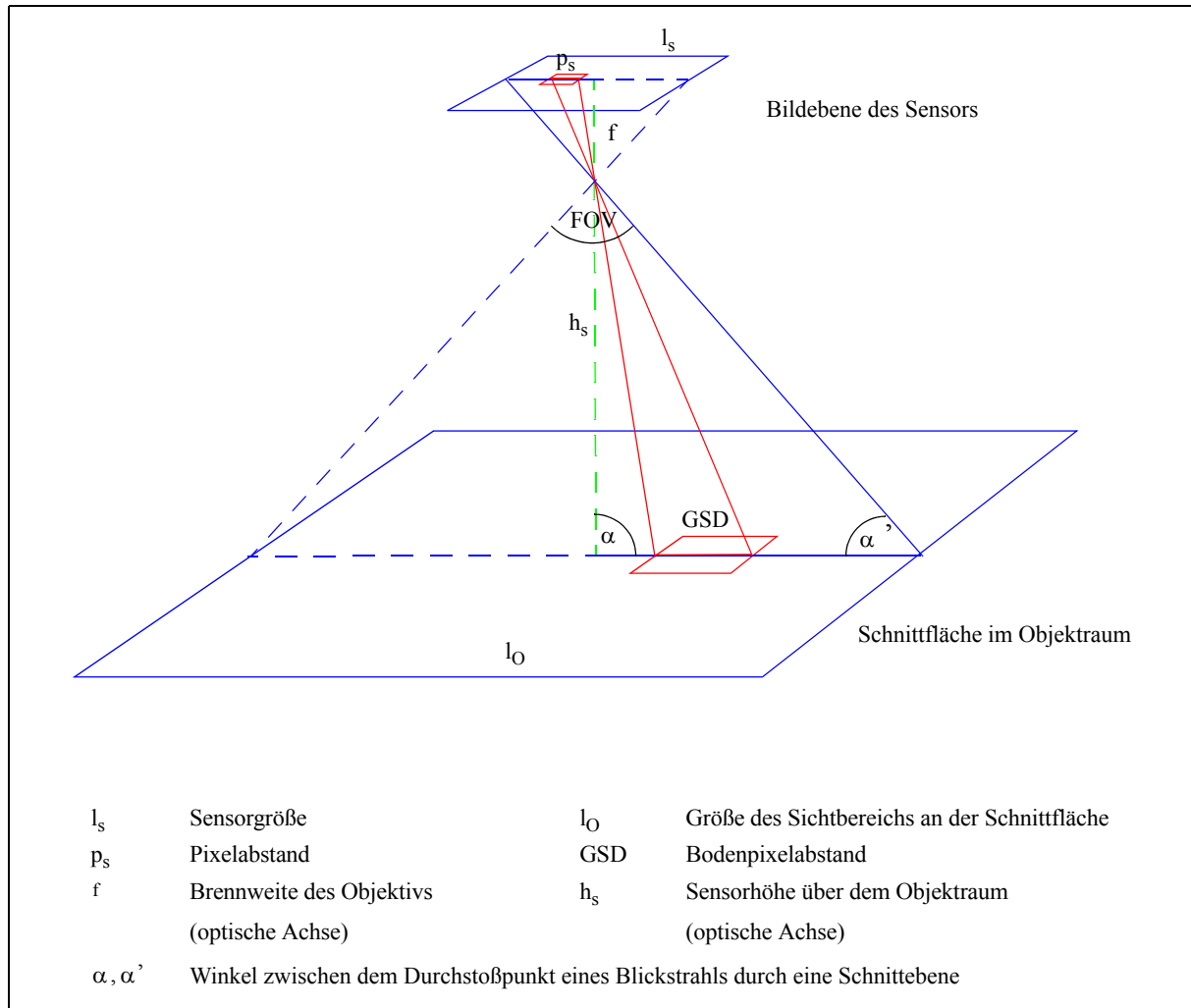


Abb. 3 Zusammenhang zwischen Sensorgeometrie, Aufnahmehöhe, Blickfeld und Ortsauflösung bzw. Bodenpixelabstand (GSD)

Der Abbildungsbereich eines einzelnen Sensors soll aus Kostengründen möglichst groß sein. Gleichzeitig muss die Ortsauflösung sowohl den Erfordernissen der Algorithmen¹⁴ des Messsystems als auch denen zur Verkehrsbeeinflussung entsprechen.

Die Größe des durch einen Sensor abgebildeten Verkehrsraums und die Ortsauflösung der darin enthaltenen Objekte wird über den Abstand zwischen Sensor und den Objekten, die Blickrichtung des Sensors und seine geometrischen Eigenschaften bestimmt. Prinzipiell besteht eine lineare Abhängigkeit zwischen den einzelnen geometrischen Parametern, Tab.1. An dieser Stelle wird auf die geometrischen Zusammenhänge hingewiesen, da sie zur Festlegung der Sensorkonfiguration eine wichtige Rolle spielen.

14. Verkehrsobjektdetektion, Verkehrsobjektverfolgung (Verkehrsobjekttracking und Wiedererkennung), Verkehrsobjektfusion

Die Größe des Abbildungsbereichs bzw. des erfassbaren Straßenverkehrsraums wird über das Blick- bzw. Sichtfeld des Sensors festgelegt. Die Größe und Gestalt des Abbildungsbereichs ist von dem Öffnungswinkel (FOV)¹⁵ des Sensors, der Entfernung zwischen Sensor und dem Objekt sowie dem vertikalen Blickwinkel des Sensors auf den Straßenraum abhängig. Das Blickfeld ist sowohl zur Größe des Öffnungswinkels als auch zur Entfernung zwischen Sensor und Objekt direkt proportional, Abb.3, Abb.5 und Tab.1. Der Öffnungswinkel wird in horizontaler und vertikaler Richtung über die Brennweite des Objektivs und die Größe bzw. die Kantenlängen des photoempfindlichen Sensorchips¹⁶ festgelegt. Dieser Zusammenhang ist indirekt proportional. Je kleiner die Brennweite und je größer die Kantenlänge des Sensorchips, desto größer ist der Öffnungswinkel und damit das Sichtfeld des Sensors.

Das Blickfeld des Sensors bildet mit dem Verkehrsraum, der zur Vereinfachung als Ebene angenommen wird, eine Schnittfläche, Abb.4. Die Größe und Gestalt hängt von der Sensorgeometrie, der Entfernung zwischen Sensor und der Straßenverkehrsebene sowie dem Blickwinkel ab. Bei einer senkrechten Blickrichtung ist die Schnittfigur ein Rechteck. Mit zunehmender Verkippung aus der senkrechten Sensorlage wird aus dem Quadrat ein Trapez, Abb.4.

Die Trapezform variiert in Abhängigkeit der Sensorgeometrie, des Blickwinkels und der Sensorhöhe über der Straßenebene. Bei horizontaler Blickrichtung wird ein dreieckiger Ausschnitt der Straßenebene abgebildet, Abb.4 (c) und (f). Das setzt allerdings den direkten Kontakt des Sensors mit der Ebene voraus, d. h. die Aufnahmehöhe ist gleich Null. Dieser Fall ist damit für die Aufgabenstellung nicht von Bedeutung.

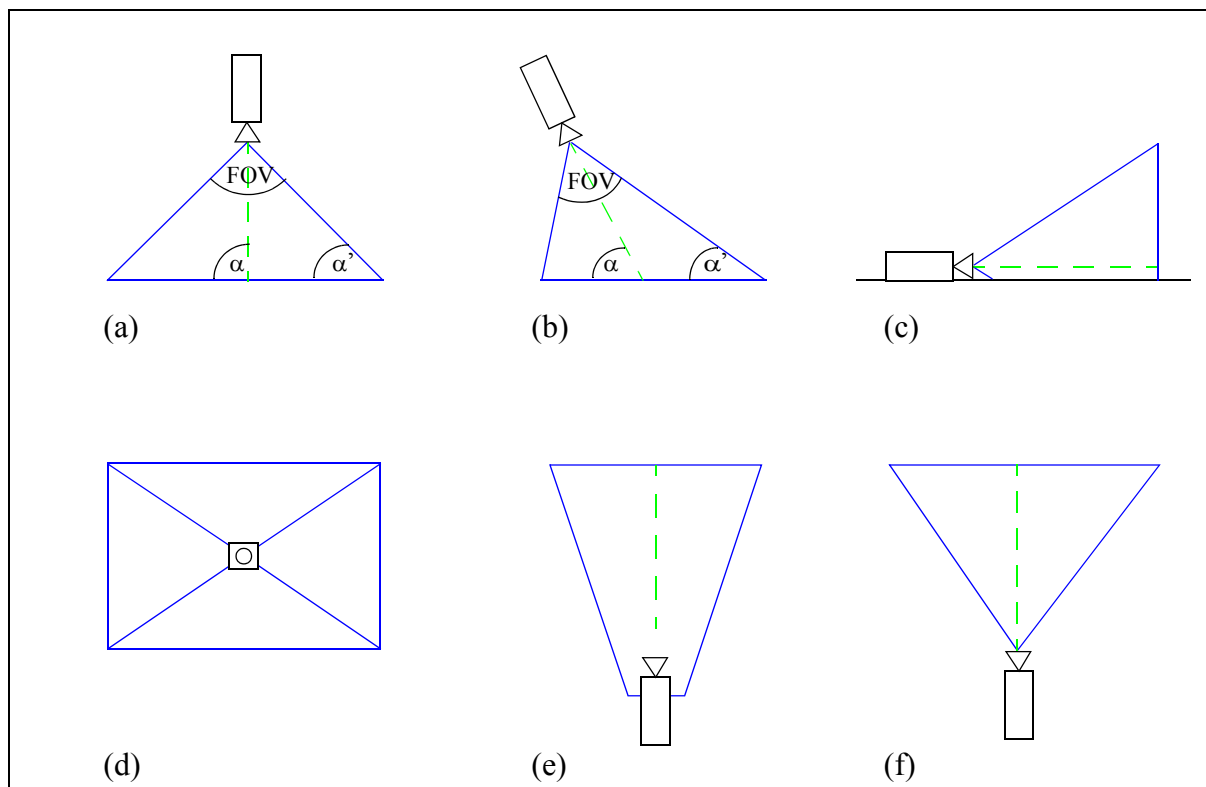


Abb. 4 Schnittfläche zwischen Sensor und Straßenebene in Abhängigkeit des vertikalen Blickwinkels α zwischen der optischen Achse und der Schnittebene - Oben: Grundriss, Unten: Aufriss, Vertikale Blickrichtung = 90° (a) und (d), Vertikale Blickrichtung $>90^\circ$ bis $>0^\circ$ (b) und (e), Vertikale Blickrichtung = 0° (c) und (f)

15. Field Of View

16. primär bei CCD-Sensoren

Der Abbildungsmaßstab wird einerseits durch den Abstand zwischen Sensor und Objekt und andererseits durch die Sensorgeometrie festgelegt. Mit zunehmendem Abstand werden die Objekte durch den Sensor kleinmaßstäbiger abgebildet. Das bedeutet eine Abnahme der Ortsauflösung bzw. des Bodenpixelabstands mit zunehmender Entfernung zum Sensor, Abb.5. Der Bodenpixelabstand beschreibt die Kantenlänge eines Objekts in der Realität, die durch ein Pixel aufgelöst wird. Er ist direkt proportional zur Objektbrennweite und zum Pixelabstand. Der Pixelabstand beschreibt die Kantenlänge eines einzelnen photoempfindlichen Elements des Sensorchips.

Die Anschaffungskosten eines opto-elektronischen Messsystems zur Verkehrsdatenerhebung sind mit der Anzahl und geometrischen Ausstattung der Sensoren verknüpft. Sie sind damit ebenfalls ein Faktor, der die räumliche Verfügbarkeit beeinflusst. Ein erheblicher Kostenfaktor handelsüblicher Sensoren ist der photoempfindliche Chip¹⁷. Der Preis steigt mit der Anzahl photoempfindlicher Elemente bzw. der Sensorgröße. Um die Anschaffungskosten des Systems möglichst gering zu halten, sollten preisgünstige Sensoren anstelle von teuren Speziallösungen verwendet werden. Dabei ist jedoch die von der Bildverarbeitung geforderte Ortsauflösung zu berücksichtigen. Für opto-elektronische Flächensensoren, die im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums empfindlich sind, wird eine Auflösung von 720 x 576 Pixel (PAL) bis 1024 x 768 Pixel (XGA) als sinnvoll erachtet. Bei handelsüblichen ungekühlten TIR-Sensoren ist die Auswahl aufgrund der geringeren Pixelanzahl von 320 x 240 deutlich eingeschränkt. Das räumliche Auflösungsvermögen von TIR-Sensoren ist damit im Vergleich zu VIS-Sensoren etwa halb so groß. Diese Annahme gilt unter der Bedingung, dass weitere geometrische Merkmale, z. B. Objektbrennweiten und Pixelabstand, beider Systeme vergleichbar sind.

Zur Installation der Sensoren eines bodengebundenen Messsystems kommen nur Objekte in unmittelbarer Nähe des Straßenraums, z. B. Häuser oder Lichtmasten, in Betracht. Für eine Großstadt wie Berlin wäre aufgrund der größtenteils geringen Installationshöhen eine typische Aufnahmehöhe zwischen 10-20m zu erwarten. Aufgrund der geringen Montagehöhe würde bei einer Blickrichtung senkrecht zur Fahrbahn mit einem einzigen Sensor nur ein kleiner Ausschnitt des Straßenraums abbildbar sein. Der Einsatz von Objektiven mit geringen Brennweiten würde diesen Nachteil nur in einem geringen Umfang ausgleichen. Bei einem handelsüblichen Flächensensor mit XGA-Auflösung, einer horizontalen Kantenlänge von max. 1.5cm¹⁸ und einer Objektbrennweite von 4.3mm wäre das Sichtfeld des Sensors bei einer senkrechten Aufnahmeposition von 20m über dem Verkehrsraum relativ klein. Die abgebildete Kantenlänge des Verkehrsraums würde ca. 50m betragen. Damit könnte lediglich die Verkehrsfläche des Knotenbereichs, nicht aber gleichzeitig seine Zu- und Abflüsse beobachtet werden. Um den Verkehrsknoten und seine Umgebung entsprechend den Anforderungen an die räumliche Datenverfügbarkeit abzubilden, wäre eine größere Anzahl an Sensoren erforderlich. Mit einem einzigen Sensor kann ein wesentlich größerer Ausschnitt des Straßenraums erfasst werden, wenn eine schräge Blickrichtung zum Straßenverkehrsraum gewählt wird. Die Schnittfigur mit der Straßenebene hätte in diesem Fall eine Trapezform, Abb.4. Die Anzahl der benötigten Sensoren kann dadurch deutlich reduziert werden. Der finanzielle und infrastrukturelle Aufwand würde im Vergleich zu dem erstgenannten Szenario deutlich geringer sein. Die Beobachtung eines Verkehrsknotens mit allen Zu- und Abflussbereichen ist durch einen einzigen Sensor jedoch auch unter diesen Aufnahmebedingungen nicht möglich. Die Gründe liegen in der Geometrie des Verkehrsknotens und Sichteinschränkungen durch Häuser, Bäume u. a. Objekte infolge der geringen Aufnahmehöhe.

17. primär bei TIR, aber auch im VIS-Bereich bei CCD-Sensoren

18. entspricht bei 1024Pixeln einem Pixelabstand von ca. 15µm

Die Anforderungen an den zu beobachtenden Ausschnitt des Straßenraums an einem Verkehrsknoten sind letztendlich nur durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Sensoren erfüllbar. Es wird jeweils ein Sensor zur Beobachtung einer Fahrtrichtung veranschlagt, Abb.2.

Aufgrund der geringen Aufnahmehöhe und der Blickwinkel schräg zur Straßenebene variiert jedoch der Abstand zwischen den Objekten und dem Sensor beträchtlich. Das führt zu unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben bzw. Ortsauflösungen innerhalb des Bildes. Die Ortsauflösung muss den unterschiedlichen Erfordernissen der Datenverarbeitung, in erster Linie denen der Bildverarbeitung, entsprechen. Die Detektionssicherheit ist dabei ein entscheidendes Kriterium. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die Beobachtungswinkel α' zwischen den Blickstrahlen des Sensors und der Schnittebene mit zunehmendem Abstand zum Sensor immer kleiner werden, Abb.4. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit von Objektverdeckungen durch Verkehrsteilnehmer, Bäume u. a. Die Qualität der Objektdetektion sowie der darauf aufbauenden Datenverarbeitungsschritte würde dadurch abnehmen. Die Sensoren sollten deshalb geometrisch so ausgelegt und im Verkehrsraum angebracht werden, dass das Sichtfeld des Sensors den zu erfassenden Verkehrsraum optimal und mit der größtmöglichen geometrischen Auflösung ausfüllt. Die Blickrichtung des Sensors sollte deshalb, unter Einhaltung der Anforderung an die räumliche Datenverfügbarkeit, möglichst senkrecht zur Straßenverkehrsebene sein.

Der Knotenpunkt selbst ist ein Bereich mit den höchsten Sicherheitsanforderungen. Dementsprechend sind die Ansprüche an die Detektionssicherheit dort auch am größten. Da die Qualität der Verkehrsobjektdetektion durch die Ortsauflösung und den vertikalen Blickwinkel zum Straßenraum (Objektverdeckungen) beeinflusst wird, sollte der Sensor in der Nähe des Knotenpunktes installiert sein, Abb.2. Um sowohl den Knotenpunkt als auch den Zuflussbereich durch den Sensor vollständig zu erfassen, sollte sich der Verkehrsknoten zwischen dem Standort des Sensors und dem durch ihn zu beobachtenden Zuflussbereich befinden, Abb.2. Die Blickrichtung des Sensors ist damit primär auf den Verkehrsknoten und den vom Sensorstandort aus gesehen dahinterliegenden Bereich ausgerichtet. Diese Beobachtungskonstellation gestattet gleichzeitig die partielle Abbildung des Abflussbereichs der Gegenrichtung. Außerdem sind die Zu- und Abflüsse, die sich zwischen dem Sensor und dem Verkehrsknoten befinden, ausschnittsweise erfassbar Abb.2. Voraussetzung ist jedoch eine ausreichende Entfernung des Sensors von Knotenpunkt sowie ein entsprechender Öffnungswinkel des Sensors.

Sensorkonfig.	Pixelabstand [μm]	Sensorgroße horizontal [cm]	Brennweite [mm]	FOV horizontal [$^\circ$]
1	5	0.5	12	23.54
2	5	0.5	4.3	60.35
3	15	1.5	12	64
4	15	1.5	4.3	120.35

Tab. 1 Sensorkonfigurationen bei XGA-Auflösung

Sensor-konfig.	verkehrsknotenübergreifende Wiedererkennung			Verkehrsobjektdetektion		
	max. erlaubte GSD [m]	max. Entfernung zum Sensor [m]	max. Größe Sichtfeld horizontal [m]	max. erlaubte GSD [m]	max. Entfernung zum Sensor [m]	max. Größe Sichtfelds horizontal [m]
1	0.1	240	90	0.5	1200	450
2	0.1	90	130	0.5	430	620
3	0.1	80	90	0.5	400	450
4	0.1	30	50	0.5	140	290

Tab. 2 Auswirkungen der Bildverarbeitungsanforderungen bezüglich Ortsauflösung auf die max. erlaubte Entfernung zwischen Sensor und Objekt

Die Ansprüche der Bildverarbeitungsalgorithmen an die Ortsauflösung sind im Hinblick auf die geometrische Sensorkonfiguration ebenfalls zu berücksichtigen. Eine Abschätzung der Auswirkungen verschiedener Sensorgeometrien auf die Ortsauflösung und das Blickfeld des Sensors ist deshalb unbedingt erforderlich. VIS-Sensoren werden einerseits aus Kostengründen als primär einzusetzender Sensortyp favorisiert. Durch die Preisentwicklung im Bereich ungekühlter TIR-Bolometer wird das Preisargument jedoch wahrscheinlich zukünftig entkräftet [Reulke, 2002]. Die Sensorgröße, d. h. die Pixelanzahl, ist derzeit und höchstwahrscheinlich auch mittelfristig¹⁹ bei VIS-Sensoren deutlich höher als bei ungekühlten TIR-Bolometern. Die folgenden Ausführungen zur geometrischen Ausstattung beziehen sich deshalb auf handelsübliche VIS-Sensoren. An dieser Stelle wird als Beispiel eine Abschätzung der Auswirkungen verschiedener Sensorkonfigurationen mit XGA-Auflösung auf das Sichtfeld und die Ortsauflösung vorgestellt.

Zunächst wird davon ausgegangen, dass der Pixelabstand sensorabhängig zwischen ca. 5-15µm variiert. Um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen dem Sichtfeld des Sensors und der Ortsauflösung zu erreichen, werden Objektivbrennweiten zwischen 4.3mm und 12mm verwendet. Die geometrischen Parameter lassen sich so kombinieren, dass sich für die jeweilige Pixelanzahl des Sensors das Minimum und Maximum des Öffnungswinkels (FOV) und der Ortsauflösung (GSD) ergeben. Das Ergebnis der Kalkulation ist in Tab.1-2 sowie Abb.5 dargestellt. Die linearen Abhängigkeiten zwischen Pixelabstand, Sensorgröße, Brennweite und damit FOV kommen dort zum Ausdruck. Um einen vergleichbaren FOV zu erhalten, können einzelne Größen sehr unterschiedlich kombiniert werden, Tab.1.

In Abhängigkeit der Sensorgeometrie und der Objektentfernung zum Sensor verändert sich die Ortsauflösung und horizontale Größe des Blickfeldes. Die Diagramme in Abb.5 zeigen die unterschiedlichen Öffnungswinkel sowie die entfernungsabhängigen Sichtbereiche und Ortsauflösungen für verschiedene Sensorkonfigurationen. Die X-Achse beschreibt das Sichtfeld des Sensors quer zu seiner optischen Achse. Der Abstand zwischen Sensor und den Objekten bzw. der Straßenebene wird mit der Y-Achse dargestellt. Das Sichtfeld des Sensors wird in jedem Diagramm durch zwei Linien begrenzt, die sich in ihrem Ursprung am Sensor auf der X-Achse schneiden. Innerhalb des Sichtfeldes sind Linien gleicher Ortsauflösungen aufgetragen. Diese Linien bilden Ausschnitte konzentrischer Kreise um den Sensor. Sie beschreiben das variierende räumliche Auflösungsvermögen innerhalb des Sensorblickfelds.

19. mehrere Jahre

Anhand der Diagramme kann abgeschätzt werden, ob verschiedene Sensorkonfigurationen den Bildverarbeitungsanforderungen bezüglich Ortsauflösung und der Größe des mit einem Sensor abzubildenden Verkehrsraums entsprechen. Dazu wird eine maximale Beobachtungsentfernung zwischen dem Sensor und einem Verkehrsobjekt von 300m^{20} veranschlagt.

Zur Detektion von Verkehrsobjekten durch die Bildverarbeitung sind einige wenige Pixel ausreichend [Hetzheim, 2004b]. Um motorisierte Verkehrsobjekte in einer Entfernung von ca. 250-300m zum Sensor zu detektieren, sollte der Bodenpixelabstand nicht größer als etwa 0.5m sein [Hetzheim, 2004b], Tab.6 im Anhang. Dieser Bereich kann als obere Grenze für die Ortsauflösung zur Verkehrsobjektdetektion approximiert werden.

Zur Bestimmung verkehrsknotenübergreifender Verkehrskenngrößen ist eine Wiedererkennung von Verkehrsobjekten an benachbarten Knotenpunkten nötig. Die verkehrsknotenübergreifende Wiedererkennung wird zur Ermittlung von Reisezeiten zwischen einzelnen Knotenpunkten und zur Bestimmung von Quelle-Ziel-Beziehungen der Verkehrsteilnehmer verwendet. Dazu muss der Verkehrsteilnehmer nicht über das gesamte Bild verfolgt, sondern an einem bestimmten Ort möglichst umfassend charakterisiert werden. Zur Wiedererkennung sind deshalb relativ kleine Erfassungsbereiche und damit ein kleinerer Bildausschnitt ausreichend. Die verkehrsknotenübergreifende Wiedererkennung soll aus Datenschutzgründen kennzeichenunabhängig erfolgen. Außerdem ist davon auszugehen, dass sich die Abbildungsbereiche von Sensoren benachbarter Sensoren nicht überlappen. Diese Aspekte erschweren die Wiedererkennung wesentlich. Zur verkehrsknotenübergreifenden Wiedererkennung muss deshalb eine wesentlich höhere Ortsauflösung von maximal 10cm gewährleistet werden [Schlotzhauer, 2004], Tab.6 im Anhang.

Die Wiedererkennung sollte in Bildbereichen mit der höchsten Ortsauflösung durchgeführt werden. In Anlehnung an die vorgeschlagene Position und Blickrichtung des Sensors wären die günstigsten Orte der Bereich des Verkehrsknotens sowie der Bereich zwischen dem Knotenpunkt und dem Sensor.

Je nach vorgeschlagener Sensorkonfiguration variiert der Ausschnitt, in dem eine Ortsauflösung von unter 10cm realisiert wird, zwischen ca. 30m bis 200m, Tab.2. Die Anforderungen der verkehrsknotenübergreifenden Wiedererkennung an die Ortsauflösung werden mit den Sensorkonfigurationen zwei und drei bis zu einer Entfernung von annähernd 100m erfüllt. Die Anforderungen der Wiedererkennung an die Ortsauflösung sind damit ausreichend berücksichtigt. Außerdem ist bei diesen Konfigurationen bereits in geringer Entfernung zum Sensor ein relativ großes Sichtfeld gegeben. Diese Sensorkonfigurationen bieten angesichts der zu erwartenden geringen Sensorhöhe über dem Verkehrsraum ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den Anforderungen an den abzubildenden Verkehrsraum und der Ortsauflösung. Dementsprechend positiv können diese beiden Konfigurationen bezüglich ihrer Eignung für ein Messsystem bewertet werden, Tab.3 und Tab.7 im Anhang.

20. 50-70m (Entfernung Sensor bis zum Verkehrsknoten) + 50-70m (Verkehrsknoten)
+ 120m (Zuflussbereich zum Verkehrsknoten) + 20 m (variierende Sensorhöhe)

Bei der ersten Variante liegt die Ortsauflösung bis zu einer Entfernung von ca. 200m zum Sensor unter 10cm, Tab.2. Die Wiedererkennung könnte demnach nahezu in dem gesamten zu beobachtenden Verkehrsraum vorgenommen werden. Der für die Verkehrsobjektdetektion in Betracht kommende Beobachtungsbereich könnte außerdem bis auf über 800 m ausgedehnt werden. Allerdings ist das Sichtfeld mit einem Öffnungswinkels von ca. 24° relativ klein, Tab.2. Der Sensor müsste entweder in einem größeren Abstand zum Verkehrsknoten oder in relativ großer Höhe angebracht werden, um auch die Bereiche zwischen Sensor und dem Verkehrsknoten zu erfassen, Tab.3. Da bei geringen Aufnahmehöhen und kleinen vertikalen Blickwinkeln mit zunehmender Entfernung vom Sensor gegenseitige Verdeckungen der Verkehrsobjekte deutlich zunehmen, wird eine zu große Entfernung zwischen Sensor und Objekt bei gleichzeitig schrägen Blickwinkeln generell als ungünstig eingestuft. Der Abstand zwischen Sensor und Verkehrsknoten sollte deshalb unter diesen Bedingungen nicht zu groß werden. Die Installation des Sensors in größerer Höhe über dem Verkehrsraum ist auf eine entsprechende Gebäudeinfrastruktur angewiesen und damit nur in Ausnahmefällen möglich.

Bei der vierten Sensorkonfiguration werden aufgrund des großen Öffnungswinkels von 120° die Grenzen der akzeptablen Ortsauflösung für die Verkehrsobjektdetektion und die Wiedererkennung in geringer Entfernung erreicht, Tab.2. Diese Konfiguration wäre bei sehr geringen Aufnahmehöhen und großen Vertikalwinkeln zu favorisieren, Tab.3.

Sensor-konfig.	Verhältnis Sichtfeld - GSD	Geringer Sensorabstand zu Objekten, geringe Sensorhöhe kleiner Vertikalwinkel zur Straßenebene	Großer Sensorabstand zu Objekten, geringe Sensorhöhe, kleiner Vertikalwinkel zur Straßenebene	Große Sensorabstand zu Objekten, große Sensorhöhe, großer Vertikalwinkel zur Straßenebene
1	-	--	0	+
2	++	++	+	+
3	++	++	+	+
4	-	+	--	--

Tab. 3 Bewertung der Eignung verschiedener Sensorkonfigurationen bei verschiedenen Standorten und vertikalen Blickwinkeln zum Straßenraum - (-(-) negativ, ++(+) positiv, 0 ausreichend)

Die bisherigen Betrachtungen zur räumlichen Datenverfügbarkeit beziehen sich auf einen einzelnen Verkehrsknoten. Die Festlegung der Anzahl und Verteilung der Sensoren, von einem Verkehrsknoten bis zum gesamten Netz, ist letztendlich eine Gratwanderung zwischen den Anforderungen an die räumliche Verfügbarkeit von Verkehrsdaten zur Verkehrsbeeinflussung und dem ökonomischen Zwang, die Kosten für ein solches opto-elektronisches Messsystem möglichst gering zu halten. Die Anzahl der Verkehrsknoten, die innerhalb eines Verkehrsnetzes mit opto-elektronischen Sensoren ausgestattet werden, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Wichtige Einflussgrößen sind außer dem Kosten-Nutzen-Verhältnis die Größe und Infrastruktur des Verkehrsnetzes sowie die darin auftretenden Verkehrsbelastungen, die Übertragungs- und Datenverarbeitungskapazitäten der Sensoren und die geplanten Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen.

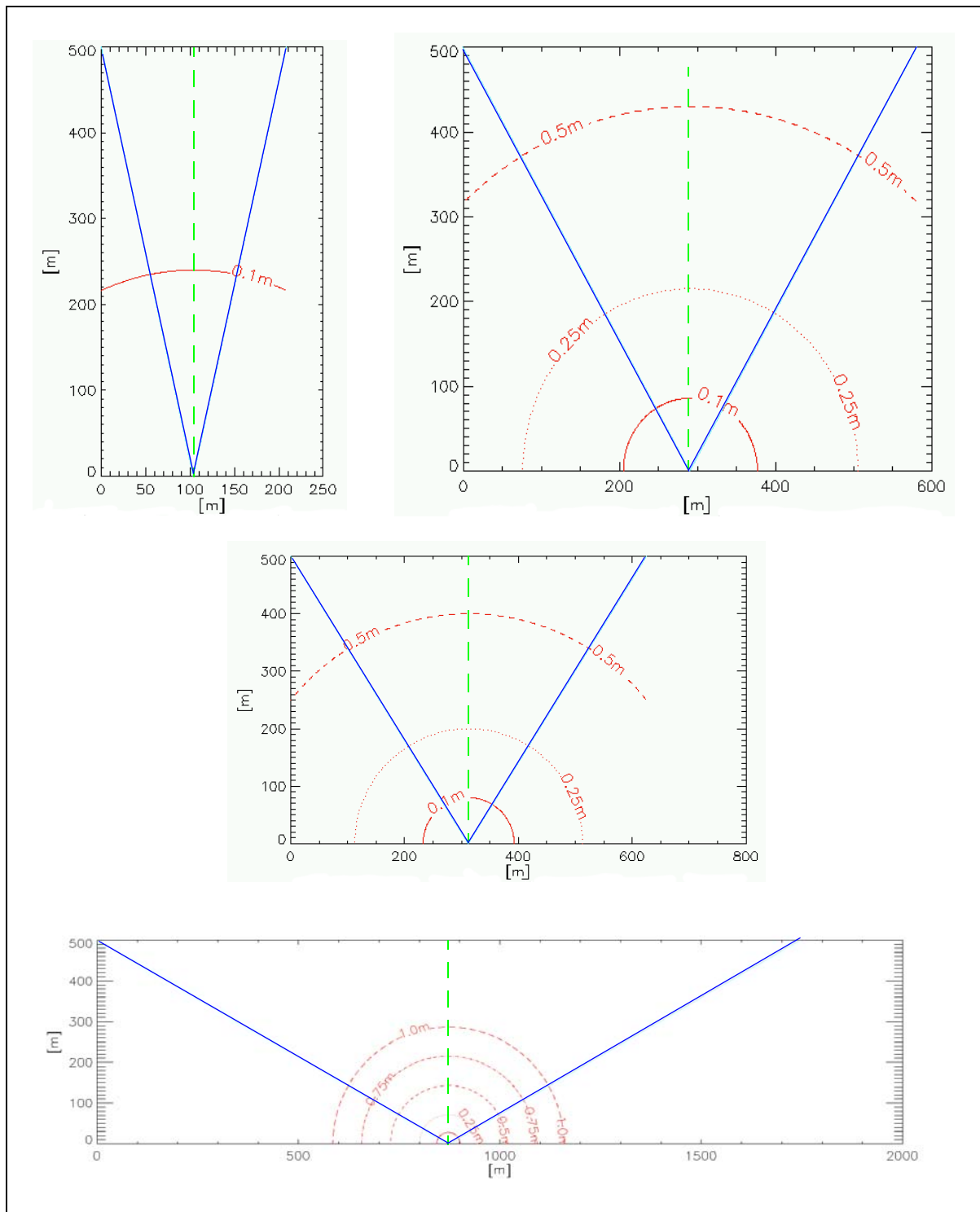


Abb. 5 Blickfeld und Ortsauflösung bzw. Bodenpixelabstand (GSD) in Abhängigkeit der Sensorgeometrie und Entfernung zwischen Sensor und Objekt - Beispiel, horizontale Sensorauflösung 1024 Pixel (XGA)

Links oben: 1. Konfig. - Pixelabstand $5\mu\text{m}$, Sensorgröße 0.5cm, Brennweite 12mm, FOV 23.54° ,
 Rechts oben: 2. Konfig. - Pixelabstand $5\mu\text{m}$, Sensorgröße 0.5cm, Brennweite 4.3mm, FOV 60.35° ,
 Mitte: 3. Konfig. - Pixelabstand $15\mu\text{m}$, Sensorgröße 1.5cm, Brennweite 12mm, FOV 64° ,
 Unten: 4. Konfig. - Pixelabstand $15\mu\text{m}$, Sensorgröße 1.5cm, Brennweite 4.3mm, FOV 120.35°

3.5 Verkehrsobjektdetektion und Detektionssicherheit

Die Verkehrsobjektdetektion erfolgt anhand der Bilddaten eines Sensors. Sowohl motorisierte als auch nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer sollen unabhängig von variierenden Umweltbedingungen innerhalb festgelegter Erfassungsbereiche mit gleichbleibend hoher Qualität detektiert werden. Das erfordert die Verwendung geeigneter Bildverarbeitungsalgorithmen, die gegenüber wechselnden Witterungs-, Beleuchtungs²¹-, und Verkehrsbedingungen²², robust sind [Reulke, 2002].

Die Anforderungen an die Detektionssicherheit sind durch herkömmliche verkehrsabhängige LSA-Steuerungskomponenten festgelegt. Danach muss die Detektionssicherheit des Systems an Messquerschnitten der Messqualität einer Induktionsschleife vergleichbar sein. Herkömmliche opto-elektronische Messsysteme zeichnen sich bereits durch hohe Detektionsraten aus. In Untersuchungen wurde gezeigt, dass opto-elektronische Messsysteme die Detektionssicherheit von Induktionsschleifen annähernd erreichen. Für die Kenngrößen Anzahl und Geschwindigkeit wurden Abweichungen zwischen 1% bis <10% ermittelt [NIT PHASE II, 2002]. Die Detektionssicherheit opto-elektronischer Messsysteme liegt damit bei Messquerschnittsbeobachtungen unter den während der durchgeführten Tests bestehenden Umweltbedingungen bei mindestens 90%.

Zur Ableitung streckenbezogener Verkehrskenngrößen ist eine Auswertung größerer zusammenhängender Erfassungsbereiche bzw. Bildausschnitte notwendig. Die Anforderungen der Verkehrsanwendungen bezüglich der zu realisierenden Detektionsqualität sind sehr allgemein formuliert. Von einem idealen opto-elektronischen Messsystem wird eine 100-prozentige Detektionssicherheit innerhalb der zu beobachtenden Straßenverkehrsbereiche erwartet. Dieser Anspruch wird durch Sicherheits- und Regelungsaspekte der Lichtsignalanlagensteuerung sowie anderer Anwendungen, z. B. Verkehrssimulation, begründet. Eine 100-prozentige Detektionssicherheit innerhalb der Erfassungsbereiche ist jedoch aufgrund der großen Variabilität von Umweltbedingungen unrealistisch. Damit ist eine lückenlose Detektion und Verfolgung von Verkehrsobjekten im zeitlichen Verlauf ihrer Anwesenheit im gesamten betrachteten Abbildungsbereich eines Sensors unwahrscheinlich. Das hat Konsequenzen für Verarbeitungsschritte, die der Verkehrsobjektdetektion folgen. Die anschließenden Datenverarbeitungsmodule müssen deshalb auch mit fehlerhaften oder unvollständigen Datensätzen umgehen können. Da eine 100-prozentige Detektionsrate nicht garantiert werden kann, müssen auch die Verkehrsanwendungen dementsprechend adaptiert werden. Zur Kompensation ist der Einsatz geeigneter Ersatzwertverfahren vorstellbar.

Um in großen Bildbereichen unter verschiedensten Umweltbedingungen eine möglichst gute Detektionsqualität sicherzustellen, wäre der Einsatz mehrerer verschiedener Bildverarbeitungsansätze sowie unterschiedlicher Sensortechnologien im VIS- und TIR-Bereich denkbar. Die Bildverarbeitung würde allerdings einen Großteil der Prozessorressourcen benötigen. Die Bildverarbeitung hat deshalb sowohl auf die Datenqualität als auch auf die Echtzeitfähigkeit des Systems einen entscheidenden Einfluss [Reulke, 2002].

21. bei Tag und Nacht, 365 Tage im Jahr

22. geringes Verkehrsaufkommen bis Stau

Um die Anforderungen der Verkehrsanwendung (Lichtsignalanlagensteuerung) mit den höchsten Ansprüchen an die Detektionssicherheit und die Echtzeitfähigkeit des Messsystems gleichermaßen zu erfüllen, könnten bestimmte Bildverarbeitungsschritte durch den Einsatz spezieller Hardware²³ wesentlich beschleunigt werden. Die Realisierung der in Messquerschnitten erreichbaren Detektionsraten von ca. 90% innerhalb großer Bildausschnitte wäre bereits als großer Erfolg der Bildverarbeitung zu werten, Tab.8 im Anhang.

3.6 Verkehrsobjektverfolgung

Die Ermittlung bestimmter Verkehrskenngrößen erfordert eine Verfolgung der Verkehrsobjekte an einem Verkehrsknoten und über mehrere Knotenpunkte hinweg. Die Verkehrsobjektverfolgung beinhaltet damit zwei thematisch unterschiedliche Bereiche. Sie umfasst erstens das Wiederfinden von Verkehrsobjekten im zeitlichen Verlauf ihrer Anwesenheit im Abbildungsbereich eines einzelnen Sensors. Dieser Prozess wird auch als Verkehrsobjekttracking bezeichnet. Der zweite Teil umfasst die Verfolgung eines Verkehrsobjekt über mehrere Sensoren, die keine gemeinsame Überlappung der Abbildungsbereiche besitzen. Dieser Bereich wird als Wiedererkennung bezeichnet.

Das Tracking ist Voraussetzung zur Ermittlung bestimmter streckenbezogener Kenngrößen, z. B. Geschwindigkeiten und Reisezeiten. Das Verkehrsobjekttracking ist außerdem zur Ermittlung bestimmter verkehrsteilnehmerspezifischer Kenngrößen, z. B. das Abbiege- und Fahrspurwechselverhalten, quantifizierbar. Da ein Verkehrsknoten nur von mehreren Sensoren vollständig erfassbar ist, müssen die Verkehrsobjekte über mehrere Sensoren verfolgt werden. Voraussetzung sind partielle Überlappungen der Abbildungsbereiche einzelner Sensoren sowie geeignete Algorithmen zur Datenfusion.

Eine im räumlichen Sinne lückenlose Beobachtung des gesamten Verkehrsnetzes ist im Zuge einer bodengestützten Verkehrsauswertung unrealistisch. Da sich die Erhebung von Verkehrsdaten an Verkehrsknoten konzentriert und nicht jeder Verkehrsknoten im Verkehrsnetz mit Sensoren ausgestattet wird, bleibt ein Großteil des Verkehrsnetzes unbeobachtet. Zur Ermittlung von Quelle-Ziel-Beziehungen ist jedoch eine verkehrsknotenübergreifende Objektverfolgung notwendig. Quelle-Ziel-Beziehungen sind z. B. zur Erforschung des urbanen Mobilitätsverhaltens von Bedeutung. Um die Verkehrsobjekte über einzelne Verkehrsknoten hinweg zu verfolgen, ist eine verkehrsknotenübergreifende Wiedererkennung durchzuführen. Das setzt den Austausch von Daten zwischen den Sensorsystemen verschiedener Verkehrsknoten voraus und hat somit Auswirkungen auf das Datenmanagement und die Datenübertragungsinfrastruktur.

Das Verkehrsobjekttracking und die verkehrsknotenübergreifende Wiedererkennung von Verkehrsobjekten müssen aus Datenschutzgründen kennzeichenunabhängig und damit anonym erfolgen. Das erschwert insbesondere die Wiedererkennung von Verkehrsobjekten über mehrere Knotenpunkte durch die Bildverarbeitung erheblich.

23. FPGA (Field Programmable Gate Array) oder DSP (Digital Signal Processor)

3.7 Datenvergleichbarkeit

Zur Herstellung von Datenmodellen, mit denen das Verkehrsgeschehen auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen abgebildet wird, müssen die von den einzelnen Sensorsystemen erzeugten Daten untereinander vergleichbar sein. In diesem Zusammenhang sind Schritte zur Datensynchronisation und zur Vereinheitlichung der Sensordaten im räumlich-geografischen Sinne notwendig.

Bei der Datensynchronisation werden zeitlich korrespondierende Daten unterschiedlicher Sensoren einander zugeordnet. Dazu muss der Bildaufnahmezeitpunkt bekannt sein und den nachfolgenden Verarbeitungsoperationen zur Verfügung gestellt werden. Das Zeitsignal sollte unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Es sollte sich um ein einheitliches amtliches Zeitsignal mit großer räumlicher Gültigkeit handeln, z. B. MEZ²⁴ oder UTC²⁵, bei dem auch eine Transformation in andere Zeitsysteme möglich ist. Besonders letzteres ist wichtig, damit Verkehrsinformations- und Aktoriksysteme die Messdaten in den eigenen Zeitrahmen stellen und mit ihnen agieren können. Das Zeitsignal kann durch verschiedene Medien, z. B. Internet, Funk oder GPS, zum Sensor übertragen werden. Der Zeittakt sollte weiterhin den Anforderungen an die zeitliche Datenauflösung des Sensorsystems (5-6Hz) entsprechen. Über die genannten Medien werden allerdings lediglich Zeitsignale im Sekundentakt übertragen. Deshalb sind geeignete Maßnahmen zur Zeitinterpolation notwendig.

Ein zweiter Aspekt der Datenvergleichbarkeit ist die Vereinheitlichung von Daten unterschiedlicher Sensoren im räumlichen Sinne. Als gemeinsame räumliche Basis bietet sich ein geografisches Bezugssystem bzw. ein Weltmodell an. Die erhobenen Messdaten können durch eine Einordnung in das Weltmodell räumlich vereinheitlicht werden und sind somit im räumlichen Sinne vergleichbar. Die Verortung der Verkehrsobjekte beinhaltet eine Transformation von Bildkoordinaten der Verkehrsobjekte in Objektkoordinaten eines übergeordneten lokalen oder globalen, z. B. WGS84²⁶ oder ETRS89²⁷, geodätischen Bezugssystems der Landesvermessung. Dieser Prozess wird als Geokodierung bezeichnet. Bei der Auswahl des Weltmodells sollte auf dessen großräumige Gültigkeit und die Möglichkeit der Überführung in andere geodätische Bezugssysteme geachtet werden. Alle weiteren Verarbeitungsschritte bis zur Verkehrskenngrößenberechnung basieren auf dem gewählten räumlichen Bezugssystem. Durch die Anbindung an einen geografisch determinierten Raum können gleichzeitig weitere Anforderungen, z. B. zur Verkehrskenngrößenberechnung und zur Datenintegration in geografische Informationssysteme, erfüllt werden.

3.8 Datenfusion

Mit einem einzigen bodengebundenen Sensor ist ein Verkehrsknoten nicht vollständig abbild- und damit auswertbar. Um Verkehrsmodelle unterschiedlicher Raumkategorien zu erzeugen, müssen die räumlich und zeitlich synchronisierten Messdaten einzelner Sensoren zusammengeführt werden. Dazu werden Algorithmen benötigt, die unter dem Begriff Datenfusion zusammengefasst werden können. Die Datenfusion wird primär in Bereichen räumlicher Überlappung der Abbildungsbereiche einzelner Sensoren durchgeführt. In diesen räumlich identischen Ausschnitten des Verkehrsraums werden zu einem bestimmten Zeitpunkt Verkehrsobjekte von mehreren Sensoren gleichzeitig erfasst.

24. Mitteleuropäische Zeit

25. Coordinated Universal Time

26. World Geodetic System 1984

27. European Terrestrial Reference System 1989

Dadurch werden redundante Informationen bezüglich der Verkehrsobjekte erzeugt, die im Zuge der Datenfusion bereinigt werden. Daten, die außerhalb von Überlappungsbereichen generiert worden sind, müssen ebenfalls in übergeordnete Verkehrsmodelle integriert werden. Dieser Prozess kann ebenfalls der Datenfusion zugeordnet werden.

Der Begriff Datenfusion kann darüberhinaus auf weitere Aufgabenstellungen ausgedehnt werden. Diese beinhalten knotenpunktübergreifende Datenverarbeitungsaufgaben, z. B. die Bereitstellung und Verarbeitung von Daten im Zusammenhang mit einer Wiedererkennung von Verkehrsobjekten. Die Einbeziehung von Daten alternativer Verkehrsdatenerfassungssysteme, z. B. FCD, bietet sich zur Ergänzung der Verkehrsmodelle opto-elektronischer Sensoren an. Dazu sind ebenfalls geeignete Strategien und Algorithmen zur Datenintegration mittels Datenfusion notwendig. Die Verkehrslage kann durch die Einbeziehung mehrerer Datenquellen auf unterschiedlichen räumlichen Kategorien, vom einzelnen Knotenpunkt bis zum gesamten Verkehrsnetz einer Großstadt, umfassender beschrieben und Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung noch gezielter durchgeführt werden.

3.9 Verkehrskenngrößen

Mit passiven opto-elektronischen Sensoren können im Gegensatz zu anderen Sensortechnologien Abbildungen erzeugt werden, die dem menschlichen Seh- und Wahrnehmungsvermögen sehr ähnlich sind. Das Verkehrsgeschehen kann dadurch wesentlich komplexer als mit anderen Sensortechnologien erfasst und bewertet werden. Das ermöglicht die Ermittlung einer Vielzahl von Verkehrskenngrößen, die nicht nur für Verkehrstelematiksysteme, sondern darüberhinaus für andere Bereiche, von der Planung bis zur Forschung, Verwendung finden können. Aufgrund der Vielzahl ermittelbarer Kenngrößen sollte jedoch bei der Konzeption und Entwicklung des Systems der Schwerpunkt auf den Parametern liegen, die für die Hauptanwendung relevant sind. Diese liegt im Bereich der Verkehrstelematik, Abb.6.

Das Spektrum der Aufgabenstellungen ist jedoch allein im Themenbereich der Verkehrstelematik vielfältig. Es reicht von Steueraufgaben herkömmlicher Lichtsignalanlagen an einem Verkehrsknoten bis zu neuartigen dynamischen Routingverfahren innerhalb des gesamten Verkehrsnetzes. Dementsprechend differenziert sind auch die Anforderungen an die zu erfassenden Kenngrößen. Sie sollen sowohl den Anforderungen herkömmlicher als auch denen neuartiger Verfahren zur Verkehrsbeeinflussung gerecht werden. Das erfordert einerseits die Berechnung klassischer induktionsschleifenspezifischer Kenngrößen durch Querschnittsbeobachtungen. Andererseits sollen größere zusammenhängende Verkehrsräume erfasst und ausgewertet werden. Die dadurch ableitbaren Verkehrskenngrößen können für zukünftige Aktorik- und Verkehrsinformationssysteme von großer Bedeutung sein. Das Potenzial wird insgesamt als sehr hoch eingeschätzt [Leich, 2001], [Mikat, 2003].

Die Aufnahme größerer zusammenhängender Bereiche des Verkehrsraums ist mit den vorgestellten Sensorkonfigurationen prinzipiell möglich. Die Auswertung der Bilddaten und die Berechnung von Verkehrskenngrößen innerhalb großer Beobachtungsbereiche kann, im Gegensatz zu anderen Messverfahren, direkt aus den Bilddaten der Sensoren erfolgen. Es ist davon auszugehen, dass die Ermittlung bestimmter streckenbezogener Kenngrößen, z. B. der Aufstelllänge vor LSA-Anlagen, exakter als mit den gängigen Extrapolationsmethoden anderer Messsysteme, z. B. BALANCE oder FCD, möglich ist.

Die Daten des Sensorsystems sollen unterschiedlichen Telematiksystemen, von der Aktorik bis Verkehrsinformationssystemen zugeführt werden. Dementsprechend unterschiedlich sind die Anforderungen an die jeweiligen Verkehrskenngrößen bezüglich der Datenaktualität und der räumlichen Datenverfügbarkeit. Für die jeweilige Anwendung müssen demnach speziell zugeschnittene Verkehrsdaten unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Kategorien erzeugt werden.

Unter räumlichen Gesichtspunkten sind sowohl verkehrsknotenspezifische als auch verkehrsknotenübergreifende Verkehrskenngrößen zu ermitteln, Abb.6. Verkehrsknotenspezifische Kenngrößen können zur lokalen Beeinflussung des Verkehrsgeschehens durch Telematiksysteme an einem Verkehrsknoten, z. B. durch Lichtsignalanlagen oder automatische Staumelder, eingesetzt werden. Mit verkehrsknotenübergreifenden Verkehrskenngrößen wird das übergeordnete, vom regionalen bis gesamtstädtischen Verkehrsgeschehen durch entsprechende Verkehrsmodelle bzw. Verkehrslagebilder abgebildet. Die Größe der Erfassungsbereiche, innerhalb derer die Verkehrskenngrößenberechnung erfolgt, entscheidet über die Art der prinzipiell ableitbaren Verkehrsparameter. In diesem Zusammenhang können querschnitts- und streckenbezogene Verkehrskenngrößen unterteilt werden, Abb.6. Mit Messquerschnitten werden kleine Ausschnitte des Straßenraums erfasst und herkömmliche induktionsschleifenspezifische Kenngrößen berechnet. Sie dienen damit der Nachbildung von Induktionsschleifen. Die von einem opto-elektronischen Sensorsystem erhobenen Messquerschnittsdaten sollen auf Aktoriksysteme zugeschnitten sein, die auf induktionsschleifenspezifische Kenngrößen angewiesen sind. Auf der Basis streckenbezogener Erfassungsbereiche sind dagegen größere Straßenausschnitte auswertbar. Die Größe dieser Erfassungsbereiche ist entsprechend den Anforderungen an die räumliche Datenverfügbarkeit anzupassen. In Anlehnung an die Darstellungen zur räumlichen Datenverfügbarkeit variiert sie zwischen 20m im Abflussbereich und bis zu 120m im Zufahrtbereich eines Verkehrsknotens. Streckenbezogene Kenngrößen wie Belegungsgrade, Wartezeiten, Aufstelllängen vor Haltelinien u. a. können direkt aus den Bildaten bestimmt werden. Diese Kenngrößen sind mit Querschnittsmessungen nicht direkt messbar. Die Hauptanwendungen liegen im Bereich verkehrsadaptiver LSA-Steuerungsverfahren und der Erstellung lokaler Verkehrsinformationen.

Verkehrsknotenspezifische und verkehrsknotenübergreifende Kenngrößen sind für Aufgaben übergeordneter räumlicher Kategorien der koordinierten Netzsteuerung durch Lichtsignalanlagen sowie Verkehrsinformationssysteme bzw. Routingsysteme relevant. Eine bedeutende Kenngröße ist die Ermittlung von Reisezeiten durch verkehrsknotenübergreifende Wiedererkennung. Für knotenübergreifende Beeinflussungsmaßnahmen können bereits an einzelnen Knotenpunkten ermittelte lokale Kenngrößen verwendet werden. So kann beispielsweise ein Verkehrsobjekt oder ein ganzer Pulk von Verkehrsobjekten bereits am nächsten Verkehrsknoten angemeldet werden, wenn es den Abbildungsbereich der Sensorik des aktuellen Knotenpunktes verlässt. Je frühzeitiger der Aktorik bestimmte Ereignisse bekanntgegeben werden, desto mehr Zeit wird ihr gegeben, darauf zu reagieren. Das setzt jedoch voraus, dass die Verkehrsobjekte in einer ausreichenden Entfernung zur Aktorik erfasst und entsprechende Daten generiert und zwischen den Mess- und Beeinflussungssystemen benachbarter Verkehrsknoten ausgetauscht werden. Die bereits vorgestellten Sensorkonfigurationen sind so ausgelegt, dass eine Detektion von Verkehrsobjekten prinzipiell in angemessener Entfernung zu Lichtsignalanlagen an einem Verkehrsknoten möglich ist.

Die Verkehrskenngrößen sind außer im räumlichen Sinne auch im zeitlichen Sinne unterteilbar. Abb.6. Um den Anforderungen der unterschiedlichen Verkehrsanwendungen gerecht zu werden, müssen die Daten entsprechend der Verkehrsanwendung in jeweils unterschiedlichen zeitlichen Aggregationsstufen vorliegen. In Abhängigkeit des Aggregationsgrades werden primäre und sekundäre Verkehrskenngrößen unterschieden. Primäre Kenngrößen werden zu jedem Bildaufnahmezeitpunkt erzeugt. Die maximale zeitliche Datenauflösung primärer Verkehrskenngrößen wird automatisch durch die Aufnahmewiederholrate im Zuge der Bilddatenerzeugung festgelegt.

Entsprechend den Anforderungen an die Bildaufnahmefrequenz liegt die maximale zeitliche Auflösung primärer Verkehrskenngrößen mit 5-6Hz deutlich über der zeitlichen Auflösung, die von der Verkehrsanwendung mit der höchsten zeitlichen Anforderung, d. h. der Lichtsignalanlagensteuerung (1-2Hz), gefordert wird.

Sekundäre Verkehrskenngrößen werden aus der zeitlichen Aggregation primärer Verkehrskenngrößen abgeleitet. Die Aggregation erfolgt in verschiedenen Zeitintervallen. Die Festlegung der Intervalle muss den Anforderungen der Verkehrsapplikationen an die zeitliche Datenauflösung angepasst sein. In Abb.1 sind die Verkehrsanwendungen entsprechend ihrer Anforderungen zur zeitlichen Datenauflösung geordnet. Die Spanne reicht von Lichtsignalanlagen und Verkehrsinformationssystemen mit sehr hohen Anforderungen bis zu Anwendungen im Bereich Verkehrsplanung und Forschung mit geringen zeitlichen Anforderungen. Die unterschiedlichen zeitlichen Anforderungen schließen die Notwendigkeit der zeitlichen Zusammenfassung von Messdaten ein. Um den Anforderungen der in Abb.1 aufgeführten Anwendungen gerecht zu werden, müssen die Verkehrskenngrößen über mehrere Stufen zeitlich aggregiert werden. Dieser Prozess ist unidirektional, d. h. aus aggregierten Daten kann nicht auf die zur Zusammenfassung verwendeten Daten geschlossen werden. Je aktueller die benötigten Daten, d. h. je zeitkritischer die Verkehrsanwendung ist, desto näher am Sensor muss die Kenngrößenberechnung erfolgen.

3.10 Erfassungsbereiche für die Verkehrskenngrößenberechnung

Zur Berechnung von Verkehrskenngrößen müssen die Verkehrsobjekte in einen räumlichen und topologischen Zusammenhang gestellt werden. Dazu werden Erfassungsbereiche herangezogen, denen die Verkehrsobjekte zugeordnet werden. Erfassungsbereiche werden bei herkömmlichen opto-elektronischen Messsystemen aufgrund der abgeleiteten induktionsschleifenspezifischen Kenngrößen auch als virtuelle Schleifen oder Regions of Interest (ROI) bezeichnet. Eine Zuordnung der Verkehrsobjekte zu Erfassungsbereichen ist auch bei der geplanten Auswertung großer Bereiche des Verkehrsraums durch die Bildverarbeitung unumgänglich, da ansonsten die Beziehungen zwischen den einzelnen Objekten und ihrer Umwelt zur Verkehrskenngrößenberechnung nicht herstellbar sind. Bei der Konzeption der Erfassungsbereiche sollten folgende Punkte beachtet werden. Die geometrische Repräsentation sollte sowohl für Querschnitts- als auch für Streckenbeobachtungen identisch sein. Bezüglich der Zuordnung von Verkehrskenngrößen zu Erfassungsbereichen ist ebenfalls eine identische Vorgehensweise sinnvoll. Erfassungsbereiche sollten sich lediglich durch benutzerdefinierte Vorgaben zur Größe (Länge und Breite) unterscheiden. Diese Standardisierungsmaßnahmen ermöglichen einen, unabhängig von der Aufgabenstellung bzw. der zu ermittelnden Verkehrskenngröße, universellen Einsatz der Erfassungsbereiche. Dazu müssen allerdings nicht zwangsläufig die klassischerweise verwendeten virtuellen Schleifen verwendet werden. Denkbar sind alternative geometrische Repräsentationen und Zuordnungsstrategien der Verkehrsobjekte zu Erfassungsbereichen.

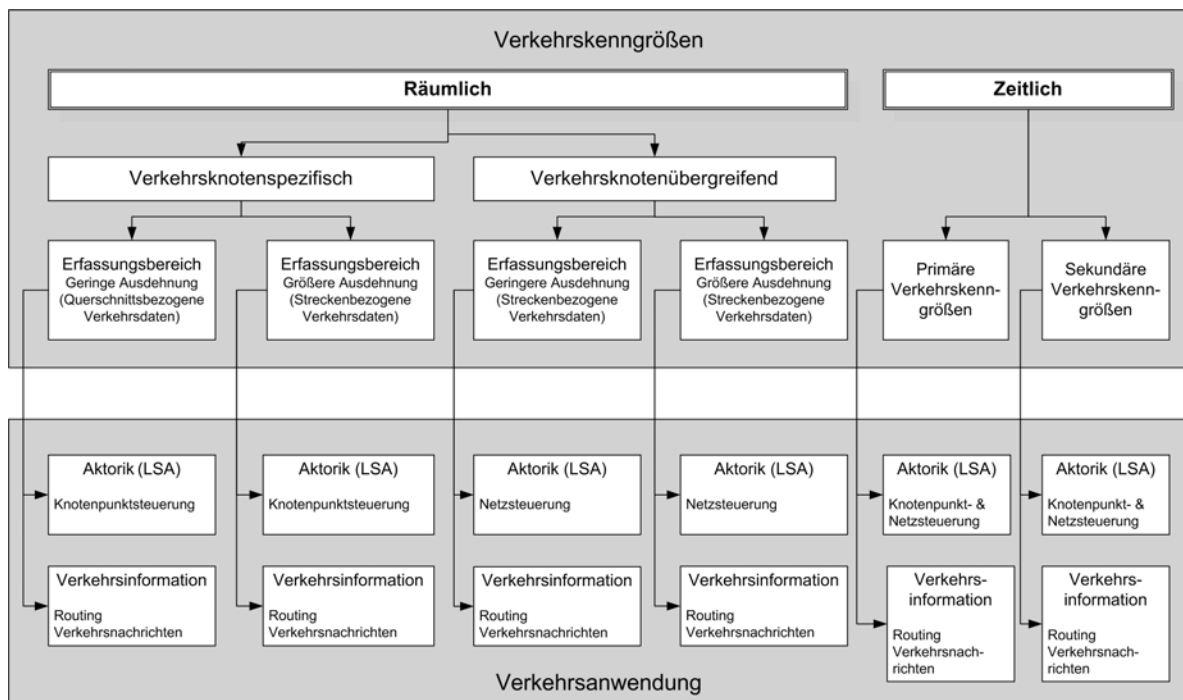


Abb. 6 Einteilung der Verkehrskenngrößen unter räumlichen und zeitlichen Gesichtspunkten, Beispiel

3.11 Datenmanagement

Innerhalb des Messsystems werden unterschiedlichste Daten erzeugt. Aufgabe des Datenmanagements ist es, alle im Vorfeld und während des operationellen, d. h. dauerhaften Verarbeitungsbetriebs erzeugten Daten den einzelnen Prozessen zur Verfügung zu stellen und sie in geeigneter Art zu verwalten. Das Datenmanagement muss den Erfordernissen der Verarbeitungsalgorithmen des Sensorsystems aber auch gleichzeitig denen der Verkehrsanwendungen gerecht werden. In diesem Zusammenhang sind verschiedene Themengebiete von eminenter Bedeutung. Diese beinhalten Fragestellungen der Datenstrukturierung, Datenübertragung, des Datenvolumens und der Datenpersistenz innerhalb des Sensorsystems.

Im operationellen Betrieb wird durch die Datenverarbeitungsprozesse ein kontinuierlicher Datenstrom erzeugt. Mit diesem Datenstrom wird das Verkehrsgeschehen unterschiedlicher räumlicher Skalen im zeitlichen Verlauf charakterisiert. Die hohen Anforderungen an die Datenaktualität, die zeitlich-räumliche Datenauflösung und die Verkehrskenngrößen verursachen ein hohes Datenvolumen innerhalb des Systems. Um die Daten längerfristig zu erhalten, muss der Datenstrom an bestimmten Verarbeitungsstufen gespeichert werden. Das folgende Szenario soll eine Abschätzung bezüglich des anfallenden Datenvolumens bei hohen Verkehrsbelastungen an einem Sensor unter Berücksichtigung der bereits vorgestellten Systemanforderungen zur zeitlichen und räumlichen Datenauflösung geben.

Am Anfang des Datenstroms stehen die Daten der extrahierten Verkehrsobjekte. Das anfallende Datenvolumen an einem Sensor zu einem Bildaufnahmezeitpunkt richtet sich nach dem Verkehrsaufkommen, der beobachteten Fahrspuranzahl, der Erfassungsbereichsgröße und der Anzahl an Merkmalen, mit denen die Verkehrsobjekte durch die Bildverarbeitung charakterisiert werden. Bei der Abschätzung des Speicheraufwandes wird weiterhin davon ausgegangen, dass es sich bei den Werten um skalare Größen handelt. Bei einer angenommenen Gesamtlänge der Erfassungsbereiche von ca. 200m²⁸ ist im Fall einer vollständigen Sättigung mit einer maximalen Anzahl von ca. 35 Verkehrsobjekten²⁹ je Fahrspur zu rechnen.

Unter der Voraussetzung, dass sämtliche Verkehrsobjekte durch die Bildverarbeitung korrekt erkannt werden, bedeutet das für einen Sensor die Erzeugung von 35 Datensätzen pro Bild und Fahrspur, Tab.9 im Anhang. Jeder Datensatz besteht wiederum aus mehreren Einträgen, mit denen Verkehrsobjekte charakterisiert werden. Zur umfassenden Beschreibung der Verkehrsobjekte wird eine Anzahl von ca. 10-15 Merkmale angenommen. Das bedeutet in diesem Fall 350-525 Dateneinträge pro Bild und Fahrspur. Bei einer Bildwiederholrate von 6Hz würde das ein maximales Datenvolumen von ca. 2100-3200 Einträgen pro Sekunde bzw. 126000-192000 Einträgen pro Minute je Fahrspur bedeuten. An einer Fahrspur wird bei 32Bit-Werten ein Datenstrom von etwa 960-1129Byte/s, bzw. bei 64Bit-Werten ein doppelt so großer Datenstrom erzeugt, Tab.9 im Anhang. Der Datentransport sollte bei diesem Datenaufkommen unkritisch sein. Da mit einem Sensor mehrere Fahrspuren gleichzeitig beobachtet werden sollen, vervielfacht sich dieser Wert in Abhängigkeit der Fahrspuranzahl und unter der Voraussetzung, dass die Verkehrssituation der anderen Fahrspuren ähnlich ist. Bei vier beobachteten Fahrspuren ergibt sich beispielsweise für einen Sensor ein Gesamtvolumen von ca. 8400-12800 Einträgen pro Sekunde bzw. 504000-768000 Einträgen pro Minute. Damit würde an einem Sensor zur Beschreibung der Verkehrsobjekte ein Datenstrom von ca. 32-104 KByte/s bei 32Bit-Werten entstehen. Zu diesem Speicherbedarf kommen weitere Dateneinträge, z. B. House-Keeping-Data mit sensorspezifischen Angaben, hinzu. Außerdem ist davon auszugehen, dass über die vier Fahrspuren hinaus weitere Bereiche des Straßenraums durch den Sensor erfasst werden. Es werden deshalb zusätzlich weitere Daten erzeugt. Für den Fall, dass der gesamte Verkehrsknoten zugestaut ist, ergibt sich für die anderen Sensoren, die ebenfalls den Knotenpunkt beobachten, das gleiche Bild. Um im räumlichen Sinne übergeordnete Verkehrsmodelle zu erzeugen, müssen die Daten der einzelnen Sensoren im Verlauf der Datenverarbeitung zusammengeführt werden. Das Datenaufkommen an einem Knotenpunkt wäre dadurch noch um ein Vielfaches höher. Zur Kontrolle des Systems ist außerdem die Übertragung des Videodatenstroms an die Leitstelle sinnvoll. Sowohl die Prozessor-³⁰ als auch die Datenübertragungskapazitäten werden dadurch jedoch zusätzlich stark beansprucht.

Die Kalkulationen in diesem Szenario sind als grobe Näherungen zu betrachten. Sie geben jedoch einen Eindruck über die Dimensionen der anfallenden Datenmengen bei extremen Stausituationen an einem Verkehrsknoten. Bei normalen Verkehrsbelastungen sollten die Werte deutlich unter dem geschilderten Szenario liegen. Im Gegensatz zum anfallenden Datenvolumen ist der Speicherbedarf mit Ausnahme des Videodatenstroms relativ gering. Eine Datenübertragung vom Sensor zur Weiterverarbeitung auf anderen physischen Komponenten ist deshalb mittels Wireless Lan³¹, denkbar. Eine kabellose Datenübertragung zwischen einzelnen Systemkomponenten sollte angestrebt werden, da sich damit die Kosten zum Aufbau der Übertragungsinfrastruktur deutlich reduzieren lassen.

28. 120m Zufluss + 50m Verkehrsknoten + 20m Abfluss

29. Durchschnittliche Fahrzeuglänge ca. 4m + 50cm Abstand zwischen stehenden Verkehrsobjekten

30. MPEG-Codierung der Bilddaten

31. Übertragungsrate 11MBit/sec

Die Speichersysteme zur Datenhaltung sollen folgenden Anforderungen entsprechen. Sie müssen erstens in der Lage sein, kontinuierliche Datenströme zu verarbeiten. Der Datendurchsatz ist von der Verkehrsbelastung abhängig und damit variabel. Die Echtzeitfähigkeit der Algorithmen zum Datenmanagement muss auch bei hohen Datendurchsätzen gewährleistet sein. An den Funktionsumfang zum Datenzugriff werden dagegen geringere Anforderungen gestellt. Diese Prozesse sollten im zeitlichen Verlauf des operationellen Datenverarbeitungsbedriebs immer identisch sein.

Datenbanken sind zur Verwaltung großer Datenmengen ausgelegt. Solche Systeme sind jedoch auf Datenbestände ausgelegt, die im zeitlichen Verlauf relativ konstant sind, d. h. der Datendurchsatz ist im Vergleich zum Datenvolumen relativ gering. Datenbanksysteme zeichnen sich außerdem durch einen sehr hohen Funktionsumfang aus. Sie sind dadurch sehr komplex. Datenbanksysteme sind aus den genannten Gründen zum Management kontinuierlicher Datenströme mit hohem Datenvolumen zu langsam. Sie sind deshalb zur Verwaltung der Daten eines opto-elektronischen Messsystems zur Verkehrsdatenerhebung nur eingeschränkt geeignet.

Lokationsdienste³² sind im Gegensatz zu Datenbanksystemen auf die Verwaltung großer Datenbestände mit hohen Datendurchsätzen sowie hohen Lese- und Schreibzugriffen ausgelegt. Sie zeichnen sich gleichzeitig durch besondere Echtzeitfähigkeiten aus. In diesen Punkten entsprechen sie eher als Datenbanken den Anforderungen an das Speichersystem zur Verwaltung des Datenstroms. Sie sind jedoch auf die Verwaltung fest definierter Datentypen, in erster Linie zur Positionsbeschreibung von Objekten, ausgelegt. Die Adaption eines Lokationsdienstes für spezielle Fragestellungen erfordert Eingriffe in die Implementierung. Diese können nur von den Entwicklern vorgenommen werden, sehr leicht adaptierbar. Datenbanken können im Gegensatz dazu mit relativ geringem Aufwand für eine spezielle Aufgabenstellung adaptiert werden.

Herkömmliche Datenbanksysteme mit Echtzeitkapazitäten³³ würden bei der dargestellten Verkehrsbelastung an einem Knotenpunkt in kurzer Zeit, d. h. in wenigen Minuten, ihre Kapazitätsgrenzen erreichen. Außerdem ist mit steigendem Füllstand der Datenbank mit deutlich längeren Zugriffszeiten für Lese- und Schreibprozesse zu rechnen. Damit ist auch die Echtzeitfähigkeit des Gesamtsystems gefährdet. Um bei der Verwendung von Datenbanken die Echtzeitfähigkeit trotzdem zu gewährleisten, müssten die Daten nach festgelegten Regeln, z. B. nach einer bestimmten Zeit oder einem definierten Füllstand, wieder aus der Datenbank und damit aus dem Datenstrom der Verarbeitungskette entfernt werden. Das bedeutet einen kontinuierlichen Datendurchsatz in kurzer Zeit innerhalb der Datenbank und eine selektive Datenübergabe zwischen den Prozessen der Datenverarbeitungskette. Die aus dem Datenstrom entfernten Daten sind in geeigneter Weise zu archivieren, Abb.7. Dadurch stehen sie für weitere Auswertungen zur Verfügung.

32. Location Based Services

33. RDBMS (Real Time Database Management Systems)

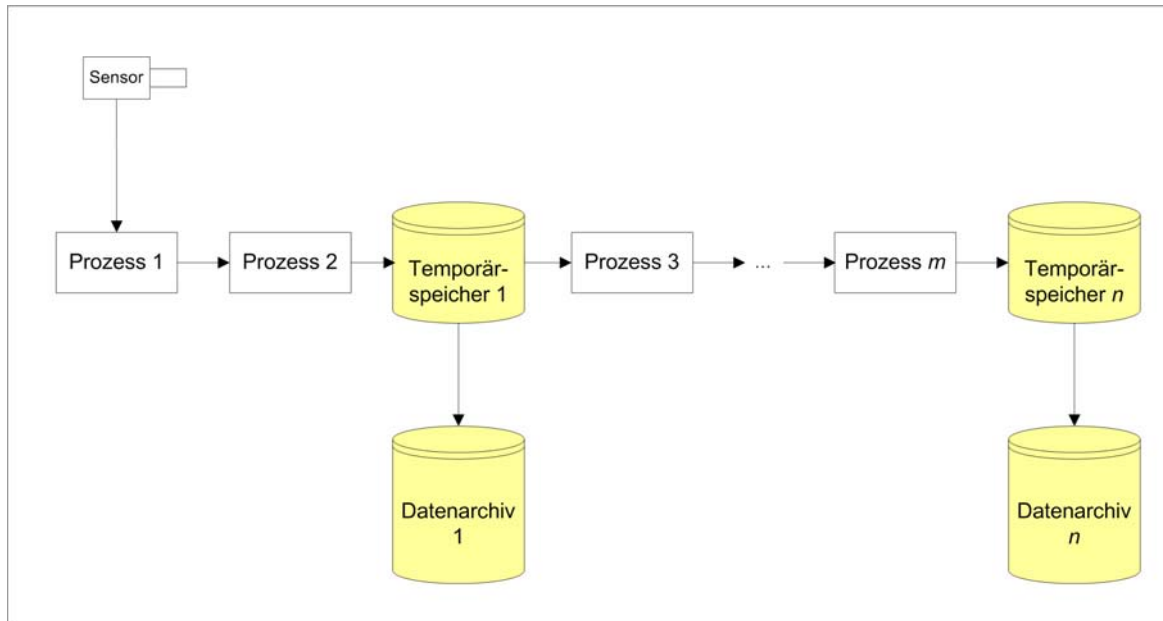


Abb. 7 Anforderung an die Datenverwaltung innerhalb der Prozesskette, Beispiel

Die Einschaltung temporärer Speichersysteme ist an bestimmten Stellen der Prozesskette sinnvoll, um sie als Datenpuffer einzusetzen. In diesem Zusammenhang können bei der Zusammenführung Daten, z. B. unterschiedlicher Sensoren, zur Erstellung räumlich übergeordneter Verkehrsmodelle vorgehalten werden, bis alle für die Weiterverarbeitung benötigten Informationen in den Speicher geschrieben worden sind, Abb.7. Auf der anderen Seite ergibt sich daraus ein gewisser zeitlicher Verarbeitungsspielraum für nachfolgende Prozesse. Außerdem bieten sich diese Speicher als Schnittstellen zu Verkehrsanwendungen mit höheren Anforderungen an die zeitliche Datenverfügbarkeit an. Insgesamt werden innerhalb des Messsystems eine Verteilung der Datenverwaltung auf mehrere Speichersysteme als sinnvoll erachtet. Die Speichersysteme können weiterhin in temporäre und permanente Speicher unterteilt werden. Sie unterscheiden sich grundsätzlich im Datendurchsatz und in der Datenpersistenz. Temporäre Datenspeicher zeichnen sich durch einen hohen Datendurchsatz und eine geringe Datenpersistenz aus, bei permanenten Speichern ist es umgekehrt. Aufgrund der Datenaggregation sowie der selektiven Übertragung verringert sich im Verlauf der Datenverarbeitung das Datenaufkommen.

3.12 Schnittstellen

3.12.1 Geografische Informationssysteme

Geografische Informationssysteme (GIS) sind ein weitverbreitetes Werkzeug zur Organisation, Analyse und Visualisierung unterschiedlichster raumbezogener Daten. Sie werden mittlerweile verstärkt zur Auswertung von Verkehrsdaten im Rahmen von Forschungs- und Planungsaufgaben eingesetzt. Die mit dem Messsystem erhobenen Daten bzw. die daraus aufgebauten Datenmodelle besitzen einen geografisch-räumlichen Bezug. Eine Einbindung in GIS würde sich demnach anbieten.

Die Verknüpfung von GIS mit opto-elektronischen Sensorsystemen zur Verkehrsdatenerhebung würde darüberhinaus zahlreiche synergetische Effekte induzieren, die von gegenseitigem Nutzen wären. Aufgrund der Kapselung klassischer GIS ist deren Verbindung mit Sensorsystemen zu einem integrierten Gesamtsystem jedoch ausgesprochen schwer zu realisieren.

Bei einer Verbindung von GIS mit den Messsystemen eines Verkehrsnetzes zu einem integrierten Gesamtsystem übernimmt das GIS die Aufgaben einer Verkehrsleitstelle. Das GIS bildet in diesem Zusammenhang eine übergeordnete Schnittstelle zwischen den Sensoren und dem Benutzer. Damit ergeben sich für GIS neue Aufgabenfelder. Das erfordert die Einführung von Funktionalitäten, die derzeit nicht Bestandteil der klassischen GIS-Welt sind.

Zwischen den Anforderungen an ein Verkehrs-GIS, das mit Daten opto-elektronischer Verkehrsdatenerfassungssysteme arbeitet, und dem Funktionsumfang herkömmlicher GIS besteht nur eine geringe Übereinstimmung.

Die Werkzeuge herkömmlicher GIS zur Visualisierung und Analyse sind auf einen konstanten Datenpool ausgerichtet. Die Schnittstellen des GIS nach außen sind dementsprechend statisch. Sie sind nicht für einen kontinuierlichen Datenimport und -export sowie die Verarbeitung von Datenströmen ausgelegt. Daten, die klassischerweise mit GIS verarbeitet werden, besitzen in der Regel eine hohe zeitliche Persistenz. Im Vordergrund der GIS-gestützten Auswertung stehen überwiegend raumbezogene Aspekte. Dementsprechend stützt sich das Sortiment der Analysefunktionen auf die Charakterisierung räumlicher Prozesse archivierter Datenbestände. Der zeitliche Aspekt ist dagegen von untergeordneter Bedeutung und wird erst in jüngster Zeit stärker berücksichtigt.

Aus diesem Grund verfügen klassische GIS über keine oder nur sehr eingeschränkte Funktionalitäten zur 4D-Datendarstellung und 4D-Datenanalyse. Die hohe räumlich-zeitliche Dynamik des Straßenverkehrsgeschehens lässt sich damit jedoch nur in einem sehr eingeschränkten Maß zum Ausdruck bringen.

Die Kopplung von Sensorsystem und GIS stellt besondere Anforderungen an das GIS, bei denen der Faktor Zeit von zentraler Bedeutung ist. Ein Großteil der räumlichen Analysefunktionen klassischer GIS wird dagegen nicht benötigt. In dem GIS werden Daten aller Sensoren zusammengeführt, die in dem Verkehrsnetz installiert und mit dem GIS in Verbindung stehen. Es muss in der Lage sein, sowohl den kontinuierlichen Datenstrom temporärer Speichersysteme im operationellen Betrieb der Sensorsysteme als auch historische Daten zu verarbeiten. Im ersten Fall ist der kontinuierliche Zugriff des GIS auf die Daten der verschiedenen Datenspeicher der Messsysteme notwendig. Das GIS muss mit den insgesamt sehr unterschiedlichen Datentypen und Datenpersistenzen, die in einem sehr großen und dynamischen Datenpool auftreten, umgehen können.

Aktuelle und historische Verkehrsmodelle unterschiedlicher Verarbeitungs- und Informationsebenen müssen durch das GIS in geeigneter Art³⁴ visualisierbar sein. Es sollen Verkehrsdaten verschiedener zeitlich-räumlicher Skalen in die Ergebnisdarstellung einbezogen werden. Die räumliche Skalierung beginnt mit dem Abbildungsbereich eines einzelnen Sensors und endet mit dem räumlichen Datenmosaik des gesamten Verkehrsnetzes. In diesen Raumkategorien sind mikroskopische Daten, d. h. auf Verkehrsobjektebene, und makroskopische Daten, d. h. Statistiken zeitlich gestaffelter Aggregationsstufen, darzustellen.

Die Dynamik von Verkehrsprozessen ist jedoch nur durch eine räumlich-zeitlich integrierte Betrachtungsweise erfass- und damit interpretierbar. Die Visualisierung von Verkehrsdaten muss deshalb unter besonderer Berücksichtigung 4D-Gesichtspunkte erfolgen. Das gilt sowohl für den aktuellen Datenstrom als auch für archiviertes Datenmaterial. Die Darstellung des kontinuierlichen Datenstroms soll in erster Linie zur Beurteilung des aktuellen Verkehrsgeschehens in Verkehrsleitzentralen herangezogen werden. Eingriffe in die Verkehrsabläufe werden heutzutage über Verkehrszentralen z. T. manuell vorgenommen. Dazu werden hauptsächlich Videodaten verwendet. Mit den Messdaten opto-elektronischer Sensoren ist die aktuelle Verkehrssituation innerhalb der Videodaten, die dem Operateur zur Verfügung stehen, quantifizierbar. Die zusätzliche Visualisierung der Messdaten innerhalb GIS kann den Operateur in der Leitstelle bei den Entscheidungen zur Verkehrsbeeinflussung unterstützen. Die Visualisierung aktueller Verkehrsdaten des Datenstroms im operationellen Betrieb setzt außerdem entsprechende Echtzeitkapazitäten des GIS voraus. Die 4D-Darstellung archivierter Daten mit GIS kann dagegen für verkehrsplanerische Aufgaben und im Forschungsbereich wichtige Impulse geben. Durch nachträgliche manuelle Analysen der Verkehrsprozesse können z. B. Konflikt- und Gefährdungspotenziale im Verkehrsraum beurteilt werden. Werkzeuge zur Koordinaten- und Streckenmessung sind in diesem Zusammenhang von Bedeutung. Das GIS ist insgesamt als Datenportal für verschiedene verkehrsrelevante Applikationen anzusehen.

Weitere Leitstellenfunktionen des GIS beinhalten administrative Aufgaben. Mit dem GIS könnten Arbeiten, die das Umfeld der Sensorsysteme betreffen und durch einen Benutzer auszuführen sind, koordiniert und durchgeführt werden. Ziel ist es, bestimmte Daten und Informationen aller verbundenen Sensorsysteme über das GIS auf Leitstellenebene zu verwalten.

Denkbare Aufgaben sind z. B. die Einordnung der Sensoren in das Verkehrsnetz unter topologischen und räumlichen Aspekten. Dadurch werden die Sensoren untereinander in Beziehung gesetzt. Das ist u. a. Voraussetzung, um aus den Daten einzelner Sensoren räumlich übergeordnete Verkehrsmodelle, z. B. in einem gesamtstädtischen Rahmen, abzuleiten. Außerdem sind Fragen der Sensorauswahl für den operationellen Datenverarbeitungsbetrieb, die Konfiguration der Sensoren und das Initiieren und Beenden der Datenverarbeitung von Bedeutung. In den Zuständigkeitsbereich des Verkehrs-GIS fallen weitere Aufgabenfelder im Vorfeld des operationellen Verarbeitungsbetriebs der Messsysteme. Sie beinhalten z. B. die geometrische Kamerakalibration zur Geokodierung der Verkehrsobjekte, die Festlegung von Erfassungsbereichen zur Verkehrskenngrößenberechnung und die Auswahl zu berechnender Verkehrskenngrößen. Sinnvoll sind weiterhin Funktionen zur Überwachung der Sensoren im operationellen Datenverarbeitungsbetrieb mittels GIS. Fehlfunktionen innerhalb des Systems könnten dem Operateur mitgeteilt werden. Ein GIS mit Leitstellencharakter sollte ebenfalls über Simulationswerkzeuge verfügen, mit denen die Realisierbarkeit der Anforderungen an die räumliche Datenverfügbarkeit bei bestimmten Sensorstandorten und Blickrichtungen abgeschätzt werden kann. Dadurch könnte die Planungssicherheit und Effizienz im Vorfeld der Ausstattung von Verkehrsknoten mit Sensoren erhöht werden.

34. z. B. digitale Karten, Grafen, Tabellen

Eine Kopplung von Sensorik und GIS zu einem integrierten Gesamtsystem wäre insgesamt überaus sinnvoll. Mit dem GIS erhält die Sensorik eine Schnittstelle zur Administration durch einen Benutzer. Auf der anderen Seite erzeugt die Sensorik einen Datenpool, der in dem GIS darstell- und analysierbar ist. Zur Realisierung der vorgestellten Anforderungen ist eine enge Abstimmung zwischen der Sensorik und dem GIS notwendig. Aufgrund der Kapselung und des hohen Aufwands zur Implementierung der Vielzahl an Funktionen, die nicht Bestandteil klassischer GIS sind, bleibt deren Kopplung mit opto-elektronischen Messsystemen zur Verkehrsdatenerhebung zu einem integrierten Gesamtsystem jedoch fraglich.

3.12.2 Verkehrsapplikationen

Der Datenaustausch zwischen dem Messsystem und den Verkehrsanwendungen erfolgt über geeignete externe Schnittstellen. Diese müssen auf die jeweilige Verkehrsanwendungen ausgerichtet sein. Fragen der geforderten Datentypen, der Datenaktualität, der zeitlichen Datenauflösung sowie der Schnittstellen sind in diesem Zusammenhang von Bedeutung. Innerhalb der Datenverarbeitungskette des Systems werden Verkehrsdaten unterschiedlicher räumlicher Kategorien und zeitlicher Aggregationsstufen abgeleitet. Die Schnittstellen zu Verkehrsanwendungen sind in den Bereichen der Verarbeitungskette umzusetzen, in denen die benötigten Daten generiert werden. Bei zeitkritischen Verkehrsanwendung sind die Anforderungen an die Datenaktualität und die zeitliche Auflösung sehr hoch. Deshalb muss die Schnittstelle im ersten Teil der Datenverarbeitung implementiert sein. Zeitkritische Anwendungen müssen die erforderlichen Daten direkt aus dem Datenstrom der Verarbeitungskette bzw. der entsprechenden Speichersysteme erhalten. Die Schnittstellen zu Anwendungen mit geringeren Zeitanforderungen sind in den sensorferneren Verarbeitungsabschnitten der Verarbeitungskette anzusiedeln. Die Spanne der Schnittstellen reicht von der primären und gleichzeitig zeitkritischsten Anwendung, der Lichtsignalanlagensteuerung, über das Routing, bis zu Planungs- und Forschungsaufgaben, die am zeitunkritischsten sind und bei denen das GIS die Schnittstelle bildet. Mit den unterschiedlichen Schnittstellen werden verschiedene Informationsdienste angeboten, die auf einzelne Verkehrsanwendungen zugeschnitten sind.

4 Sensor- und Datenverarbeitungskonzept

4.1 Überblick

In Anlehnung der beschriebenen Anforderungen an ein ideales bodengebundenes opto-elektronisches Messsystem zur Verkehrsdatenerhebung kann ein Sensor- und Datenverarbeitungskonzept formuliert werden. Mit dem folgenden Konzept werden die wesentlichen Komponenten eines solchen Systems vorgestellt.

Der Grundgedanke des Sensor- und Datenverarbeitungskonzepts besteht in der Verknüpfung einzelner Sensoren mit weiteren Systemkomponenten zu einem hierarchisch gegliederten Gesamtsystem, Abb.8. Ein solches System wird als Sensornetzwerk bezeichnet [Reulke, 2002]. Das Sensornetzwerk gliedert sich in physische und logische Ebenen. Physische Ebenen repräsentieren die realen Bestandteile bzw. die Hardware des Systems. Die Anzahl der Hardwarekomponenten, z. B. Sensoren und Rechner, auf einer physischen Ebene ist skalierbar. Einflussgrößen sind u. a. die Anzahl, Größe und Gestalt der zu beobachtenden Verkehrsknoten und Aspekte der Systemleistung. Innerhalb des Sensornetzwerkes sind die Datenverarbeitungsoperationen auf logische Ebenen verteilt. Das sind Bereiche, in denen die Datenverarbeitung unter inhaltlichen Gesichtspunkten eine übergeordnete, in sich geschlossene Einheit bildet. In Anlehnung an die Anforderungen bezüglich der abzuleitenden Verkehrskenngrößen wird für großstädtische Bereiche eine Unterteilung in vier logische Ebenen vorgeschlagen [Schischmanow, 2003]. Die Anzahl der physischen Ebenen kann, muss aber nicht mit denen der logischen Ebenen korrespondieren.

Die Verarbeitungsschritte innerhalb der logischen Ebenen werden auch als Prozesse bezeichnet. Sie sind auf den logischen Aufbau des Gesamtsystems abgestimmt. Die Prozesse sind in verschiedene Kategorien unterteilbar. Diese gliedern sich in Vorverarbeitungsschritte zur Konfiguration der Datenverarbeitungskette, die Datenverarbeitung im automatisierten Datenverarbeitungsbetrieb zur Berechnung von Verkehrskenngrößen aus dem Bilddatenstrom sowie die Ergebnisvisualisierung und interaktive Ergebnisanalyse durch einen Benutzer. Die einzelnen Verarbeitungsprozesse ergeben zusammen eine von der Konfiguration, über die Bilddatenaufnahme bis zur Visualisierung von Verkehrsdaten und Verkehrsinformationen durchgehende Datenverarbeitungskette, Abb.8-9.

Auf jeder logischen Ebene werden durch die jeweiligen Verarbeitungsoperationen Verkehrsmodelle erzeugt. Die abgeleiteten Daten werden an die jeweils nachfolgenden Prozesse übergeben und dort weiterverarbeitet. Der Datentransport erfolgt sowohl innerhalb einer logischen Ebene als auch ebenenübergreifend. Die auf einer logischen Ebene abgeleiteten Daten werden an die jeweils höhere Ebene weitergeleitet. Diese Vorgehensweise ist mit einer Datenabstraktion und Datenaggregation von tieferen zu höheren logischen Ebenen verbunden und kennzeichnet den primären Datenstrom. Das System verfügt außerdem über Benutzerschnittstellen, mit denen das System konfigurierbar und die Ergebnisse der Verarbeitungsoperationen visualisierbar sind. Der sekundäre Datenstrom wird durch Konfigurationsdaten und Datenanfragen von Prozessen höherer Ebenen erzeugt, Abb.8-9. Er ist von höheren auf tiefere Ebenen gerichtet und damit dem primären Datenstrom entgegengerichtet. Die Datenströme innerhalb des Gesamtsystems sind deshalb bidirektional.

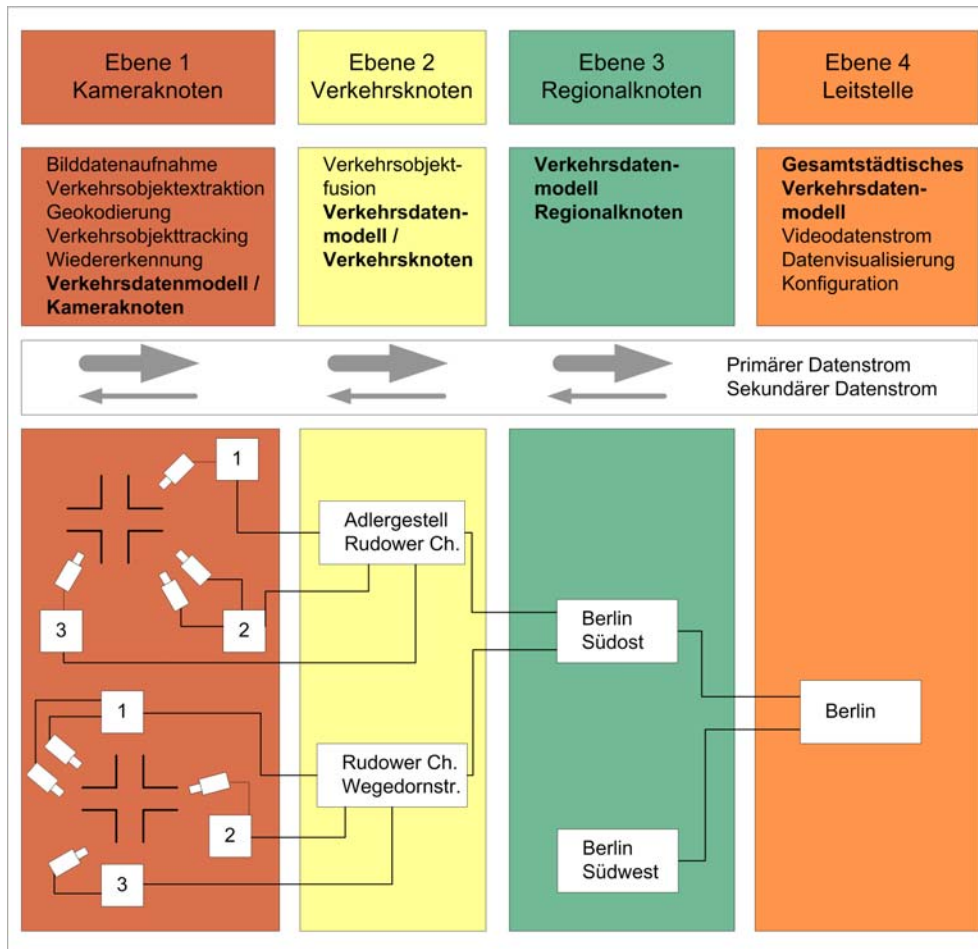


Abb. 8 Logischer Aufbau des Sensornetzwerkes, Beispiel

Ein komplexes Datenmanagementsystem regelt den Zugriff, den Transport und die Verwaltung der Daten. Die Datenübergabe zwischen den Prozessen und logischen Ebenen erfolgt selektiv. Es werden nur Daten weitergegeben, die für nachfolgende Verarbeitungsschritte notwendig sind. Auf den einzelnen logischen Ebenen des Sensornetzwerkes werden die Daten zeitlich zusammengefasst bzw. aggregiert und den einzelnen Verkehrsanwendungen zur Verfügung gestellt. Die zeitliche Datenauflösung variiert deshalb und wird von den tieferen zu höheren logischen Ebenen des Sensornetzwerkes immer geringer. Diese Vorgehensweise ist mit einer Datenreduktion auf höheren gegenüber tieferen logischen Ebenen verbunden. Damit wird gleichzeitig den begrenzten Übertragungs- und Speicherkapazitäten Rechnung getragen.

4.2 Systemkomponenten und Verarbeitungsoperationen

Zur Ableitung der Verkehrskenngrößen aus dem Bilddatenstrom müssen innerhalb des Systems eine Reihe von Verarbeitungsschritten durchgeführt werden. Die einzelnen Hardwarekomponenten und Prozesse werden an dieser Stelle definiert und in das Konzept der logischen Ebenen eingeordnet.

Kameraknoten - Ebene 1

Die unterste logische Ebene wird als Kameraknoten bezeichnet. Ein Kameraknoten besteht aus einem zentralen Rechner und einer variablen Anzahl ihm zugeordneter opto-elektronischer VIS- und / oder TIR-Flächensensoren sowie weiterer Systemkomponenten. Dazu zählen wetterfeste Sensorgehäuse, Befestigungsvorrichtungen zur Montage an geeigneten Stellen, z. B. an Gebäuden oder Lichtmasten, sowie eine geeignete Infrastruktur zur Datenübertragung. Die Anzahl der Sensoren und Kameraknoten an einem Verkehrsknoten ist skalierbar. Die Sensorstandorte und Blickrichtungen können zur Umsetzung der Anforderungen an die räumliche Datenverfügbarkeit so gewählt werden, dass sich die Abbildungsbereiche der Sensoren partiell überlappen. Dadurch kann ein zusammengesetztes Abbildungsmosaik erzeugt und ausgewertet werden. Der zusammenhängende Beobachtungsraum ist dadurch beliebig skalierbar. Die Anforderungen an die räumliche Datenverfügbarkeit sind damit prinzipiell erfüllbar. Die Aufnahme des Straßenverkehrs aus unterschiedlichen Richtungen und partielle Überdeckungen, wie sie in den Anforderungen zur räumlichen Datenverfügbarkeit dargestellt wurden, gestattet außerdem die Erfassung von Verkehrsobjekten, die von einem einzelnen Sensor aufgrund gegenseitiger Verkehrsobjektverdeckungen nicht detektierbar sind. Aufgrund der partiellen Überlappung werden Verkehrsobjekte teilweise durch mehrere Sensoren gleichzeitig detektiert. Die dadurch entstehenden Datenredundanzen können insgesamt dazu beitragen, die Sicherheit bei der Verkehrsobjektdetektion und die Qualität der Verkehrsmodelle unterschiedlicher Raumkategorien zu erhöhen.

Auf dem Kameraknoten erfolgen zunächst die Bilddatenerzeugung betreffende Vorverarbeitungsschritte. An den Bilddaten werden zunächst radiometrische Bildkorrekturen durchgeführt. Das sind im einzelnen Verfahren zur Rauschkorrektur, z. B. PRNU³⁵-Korrektur, zur Integrationszeitregelung, zur Bilddatenkompression, zur thermischen Sensorkalibration³⁶, u. a. [Schmidt, 1999]. Die Auswahl der Verfahren muss dabei auf die verwendeten Sensortechnologien³⁷ abgestimmt sein.

Im Anschluss an die Vorverarbeitung werden aus den Bilddaten durch entsprechende Bildverarbeitungsalgorithmen Verkehrsobjekte mit definierten Merkmalen extrahiert, Abb.8-9. Die Bildverarbeitung ist der schwierigste Teil der Gesamtkette. Die Entwicklung von Bilddatenverarbeitungsalgorithmen ist nicht Ziel dieser Arbeit. In den Ausführungen zur Umsetzung des Konzepts wird auf Daten, die im Rahmen des Projektes OIS entstanden sind, zurückgegriffen [Hetzheim, 2004a]. Die Bilddatenverarbeitungsalgorithmen müssen so ausgelegt sein, dass sie den Anforderungen an die Detektionssicherheit und denen der Echtzeitfähigkeit des Systems entsprechen. Zur Beschleunigung der Algorithmen zur Verkehrsobjektextraktion kann spezielle Hardware, z. B. FPGA³⁸- oder DSP³⁹- Prozessoren, eingesetzt werden. Im Bereich der Hardware lassen sich außerdem die Datenübertragungskapazitäten durch spezielle Elektronikdesigns einzelner Systemkomponenten deutlich steigern. Die Datentransferleistungen zwischen physisch getrennten Hardwarekomponenten, z. B. zwischen Sensoren und Rechnern, beeinflussen ebenfalls die Echtzeitfähigkeit des Systems. Sie können durch den Einsatz hochleistungsfähiger Netzwerkinfrastrukturen z. B. Gigabit-Ethernet oder Lichtleittechnik, entsprechend erhöht werden.

35. Photo Response Non-Uniformity

36. auf TIR-Sensoren beschränkt

37. CCD oder CMOS im VIS-Bereich, ungekühlte TIR-Bolometer im TIR-Bereich

38. Field Programmable Gate Array

39. Digital Signal Processor

Die verkehrsknotenübergreifende Verkehrsobjektverfolgung bzw. Wiedererkennung ist neben der Objektextraktion die zweite wichtige Bildverarbeitungsaufgabe. Sie wird zur Ermittlung verkehrsknotenübergreifender Kenngrößen benötigt, die zur Erstellung übergeordneter Verkehrsmodelle auf Regionalknoten- und Leitstellenebene Relevanz besitzen. Dabei handelt es sich in erster Linie um die Bestimmung von Reisezeiten und Quelle-Ziel-Beziehungen der Verkehrsteilnehmer. In Anbetracht der abzuleitenden Verkehrskenngrößen wäre eine Ansiedlung der Algorithmen zur Wiedererkennung auf höheren logischen Ebenen sinnvoll. Zur Durchführung der Wiedererkennung sind allerdings unkomprimierte Bilddaten notwendig. Die Übertragung der Bilddaten würde die Übertragungskapazitäten zusätzlich belasten. Aus diesem Grund wird eine sensornahe Durchführung der Wiedererkennung vorgeschlagen, Abb.8-9. Die Wiedererkennung hat damit eine Sonderstellung innerhalb der Datenverarbeitungskette, weil sie nicht auf der logischen Ebene durchgeführt wird, auf der die abgeleiteten Verkehrskenngrößen einzuordnen sind. Zur Ermittlung verkehrsknotenübergreifender Reisezeiten ist ein Datenaustausch zwischen benachbarten Verkehrsknoten notwendig. Dazu müssen die Verkehrsobjektdaten beim Verlassen eines Verkehrsknotens an den jeweiligen Kameraknoten des nächsten Knotenpunktes übergeben werden.

Nachdem die Verkehrsobjekte aus dem Bild extrahiert sind, erfolgt ihre Verortung in dem Weltmodell im Rahmen der Geokodierung. Anhand der Bildkoordinaten, die als Merkmal die Position des Verkehrsobjekts im Bildraum beschreiben, wird eine Position innerhalb eines übergeordneten erdfesten Koordinatensystems ermittelt. In Abhängigkeit des Verfahrens zur Koordinatentransformation werden bestimmte Parameter benötigt. Diese Parameter werden im Rahmen der geometrischen Kamerakalibration ermittelt. Die geometrische Kamerakalibration und die Geokodierung werden zusammen als Georeferenzierung bezeichnet.

Als letzter Prozess wird auf dem Kameraknoten das Verkehrsobjekttracking durchgeführt. Das Verkehrsobjekttracking bezeichnet das Wiederfinden von Verkehrsobjekten während ihrer Anwesenheitsdauer im Abbildungsbereich eines Sensors. Die dazu benötigten Informationen werden aus den Verkehrsobjektdaten extrahiert. Das Verfolgen von Verkehrsobjekten erfolgt über einen zeitlichen Vergleich der Verkehrsobjektmerkmale. Nach dem Verkehrsobjekttracking sind die Orte, der zurückgelegte Weg und damit die Fahrtrichtung sowie die Anwesenheitsdauer eines Verkehrsobjekts während seiner Erfassung durch die Sensoren bekannt.

Verkehrsknoten - Ebene 2

Auf der zweiten logischen Ebene werden die Daten aller einem Verkehrsknoten zugehörigen Kameraknoten einem zentralen Rechner zugeführt und dort weiterverarbeitet.

Auf dem Verkehrsknoten erfolgen Datenverarbeitungsoperationen zur Verkehrsobjektdatenfusion, zur Zuordnung von Verkehrsobjekten zu Erfassungsbereichen und zur Verkehrskenngrößenberechnung, Abb.8-9.

Die Verkehrsobjektdatenfusion ist der erste Prozess der Datenverarbeitung auf der Verkehrsknotenebene. Sie beinhaltet die Zusammenführung aller zu einem definierten Zeitpunkt von den Sensoren eines Verkehrsknotens erkannten Verkehrsobjekte. Im Zuge der Verkehrsobjektdatenfusion wird ein räumlich übergeordnetes Verkehrsmodell der Messdaten aller zu einem Verkehrsknoten gehörenden Sensoren erstellt. Redundante Daten, die in den Überdeckungsbereichen mehrerer Sensoren bei der Objektdetektion entstehen, werden dabei entfernt. Daten, die in nicht überdeckten Abbildungsbereichen der Sensoren erzeugt worden sind, werden ebenfalls in das übergeordnete Verkehrsmodell integriert. Voraussetzung sind jedoch zeitlich und räumlich synchronisierte Bilddaten.

Im Anschluss an die Verkehrsobjektdatenfusion erfolgt die Zuordnung von Verkehrsobjekten zu Erfassungsbereichen. Dadurch werden die Verkehrsobjekte erstens in einen topologischen Zusammenhang gestellt, z. B. Fahrspur A, Erfassungsbereich A1.

Zweitens können damit die räumlichen Beziehungen der zu einem definierten Zeitpunkt detektierten Verkehrsobjekten bestimmt werden, z. B. Verkehrsobjekt 1 folgt Verkehrsobjekt 2 auf Fahrspur C im Erfassungsbereich C1 in einem Abstand von 10m. Die räumlichen Beziehungen der Verkehrsteilnehmer sind sowohl für Telematikanwendung, aber auch für weitere Fragestellungen im Bereich der mikroskopischen Verkehrssimulation oder für verkehrsprsychologische Untersuchungen, z. B. Fahrerverhalten, von großer Relevanz.

Die Zuordnung von Verkehrsobjekten zu Erfassungsbereichen ist Voraussetzung zur Ableitung von Verkehrskenngrößen. Die klassische Vorgehensweise zur Ermittlung von Verkehrskenngrößen durch bildgebende Messsysteme beruht auf der Festlegung und Auswertung von Regions Of Interest (ROI). Durch diese Erfassungsbereiche werden klassischerweise die Geometrie und die Verkehrskenngrößen einer Induktionsschleife nachgebildet. Alternativ können auch andere Repräsentationsformen der Erfassungsbereiche verwendet werden. In mikroskopischen Verkehrssimulationen werden die Verkehrsobjekte beispielsweise an Vektoren bzw. Kanten bewegt. In dieser Arbeit wird ein alternatives Verfahren vorgestellt, das als „Fahrspurtracking“ bezeichnet wird. In diesem Verfahren sind Fahrspuren als Menge an Punkten definiert. Verkehrsobjekte werden diesen Fahrspurpunkten und damit der jeweiligen Fahrspur bzw. einem Erfassungsbereich zugeordnet.

Aus den bisher vorgestellten Datenverarbeitungsoperationen werden primäre und sekundäre Verkehrskenngrößen abgeleitet. Entsprechend den Anforderungen erfolgt eine weitere Unterteilung primärer und sekundärer in querschnitts- und streckenbezogene Verkehrskenngrößen. Querschnittsbezogene Kenngrößen werden Verkehrsanwendungen zur Verfügung gestellt, die auf herkömmliche induktionsschleifenspezifische Daten ausgerichtet sind. Dazu zählen Kenngrößen wie die Anwesenheit (Beginn, Ende, Dauer), Klasse, Geschwindigkeit und Verkehrsobjektanzahl. Streckenbezogene Verkehrskenngrößen werden für Verkehrsanwendungen abgeleitet, bei denen Daten erforderlich sind, die größere zusammenhängende Verkehrsabschnitte beschreiben. Beispiele streckenbezogener Verkehrskenngrößen sind die Verkehrsdichte, Reisezeit, Aufstelllänge vor Haltelinie. Aus den Verkehrsdaten können auf Verkehrsknotenebene Verkehrslageinformationen, z. B. flüssiger Verkehr, stockender Verkehr oder Stau, abgeleitet werden. Die verkehrliche Hauptanwendung auf der zweiten logischen Ebene ist die Knotenpunktsteuerung durch Lichtsignalanlagen.

Regionalknoten - Ebene 3

Anhand der Datenmodelle mehrerer Verkehrsknoten können übergeordnete regionale Verkehrsmodelle erstellt werden. Dazu wird für bestimmte Verkehrskenngrößen aller Verkehrsknoten, die einem Regionalknoten zugeordnet sind, ein Datenmosaik erzeugt. Dieses Datenmosaik ist allerdings nicht flächendeckend, da sich die Abbildungsbereiche der Sensoren benachbarter Knotenpunkte nicht überdecken und nicht alle Verkehrsknoten des Netzes mit Sensoren ausgestattet sind. Wichtige Kenngröße zur Beschreibung der regionalen Verkehrslage im Netzausschnitt sind z. B. Reisezeiten der Verkehrsteilnehmer, Verkehrsdichten, Verkehrsgeschwindigkeiten und Aufstelllängen an Lichtsignalanlagen. Zur Umsetzung verkehrsadaptiver LSA-Netzsteuerungsverfahren und Routingapplikationen sind solche Daten von großer Relevanz. Aus den Daten können Informationen, z. B. freier-, dichter-, stockender Verkehr oder Stau, generiert und den Verkehrsteilnehmern durch geeignete Medien⁴⁰ zur Verfügung gestellt werden.

Um regionale Datenmodelle zu erzeugen, wird die logische Ebene Regionalknoten eingeführt. Eine dem Regionalknoten korrespondierende eigenständige physische Ebene ist allerdings, im Gegensatz zu den anderen logischen Ebenen, nicht zwingend notwendig. Die Durchführung der Verarbeitungsoperationen ist in einem Zentralrechner der Leitstelle denkbar. Die Aufteilung des gesamten Netzes in Regionen kann unter verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Denkbar ist die Einteilung anhand einer festen Vorgabe bezüglich der Anzahl an Verkehrsknoten, die durch das System beobachtet werden. Andere Unterteilungsmöglichkeiten sind administrative Einheiten wie Bezirksgrenzen, z. B. Berlin-Treptow, oder räumlich-geografisch determinierte Regionen z. B. Berlin-Südost. Am sinnvollsten erscheint allerdings die Einteilung in Anlehnung an den hierarchischen Aufbau des Straßennetzes, z. B. Regionalebene I = Stadtautobahn + Hauptverkehrs- und Ausfallstraßen (Fernverkehrsstraßen, Bundesstraßen), ..., Regionalebene n = Nebenstraßen (z. B. Tempozone 30km/h). Die unterschiedlichen Vorgehensweisen beeinflussen maßgeblich die Größe, Form und Lage des Einzugsbereichs eines Regionalknotens innerhalb des Verkehrsnetzes.

Leitstelle - Ebene 4

Die oberste Ebene des Sensornetzwerkes wird als Leitstelle bezeichnet. Auf der Leitstellenebene werden die Daten aller Regionalknoten einem zentralen Leitstellenrechner zugeführt und zu einem gesamtstädtischen Datenmosaik zusammengesetzt. Auf dieser Grundlage werden Verkehrsinformationen in gesamtstädtischem Maßstab erzeugt.

Die Leitstelle hat darüber hinaus übergeordnete Aufgaben zu erfüllen. Diese Aufgaben können mit dem Begriff Verkehrs-GIS überschrieben werden. Das Verkehrs-GIS bildet die Schnittstelle zwischen dem Sensornetzwerk und einem Benutzer. Die grafischen Werkzeuge und Funktionalitäten sind speziell auf die an das GIS gestellten Anforderungen abgestimmt. Diese erfordern eine Integration herkömmlicher und neuer GIS-Funktionen. Das GIS vereint drei wesentliche Schwerpunkte.

Der erste Schwerpunkt beinhaltet Konfigurationsaufgaben. Sie umfassen die Administration des Sensornetzwerkes, die Überwachung der Datenvorverarbeitungsschritte und des operationellen Datenverarbeitungsbetriebs. Die Administration des Sensornetzwerkes beinhaltet die Einrichtung der logischen Struktur. Dadurch können Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten des Systems hergestellt und die Verarbeitungsprozesse der logischen Ebenen koordiniert werden. Das ist vor allem für die Übergabe von Daten zwischen Verarbeitungsprozessen von Bedeutung. Als Beispiel kann der Austausch von Verkehrsobjektdateien zwischen benachbarten Knotenpunkten im Rahmen der Wiedererkennung genannt werden. Dazu müssen dem System korrespondierende Zu- und Abflüsse benachbarter Verkehrsknoten bekannt gegeben werden. Weitere Konfigurationsaufgaben liegen in der Überwachung des Datenverarbeitungsbetriebs. Ein Operateur muss jederzeit über den Systemzustand informiert sein und bei Störungen entsprechende Maßnahmen einleiten. Außerdem sind im Vorfeld des Datenverarbeitungsbetriebs von einem Benutzer diverse Vorverarbeitungsschritte, nötig. Dazu zählen die geometrische Kamerakalibration und die Festlegung von Erfassungsbereichen zur Verkehrskenngrößenberechnung. Außerdem stehen dem Benutzer Werkzeuge zur Auswahl der Sensoren, die an der Verarbeitung teilnehmen, und Werkzeuge zur Auswahl der zu berechnenden Verkehrskenngrößen zur Verfügung.

40. z. B. Radio (RDS/TMC), elektronische Hinweisschilder oder Fahrerassistenzsysteme

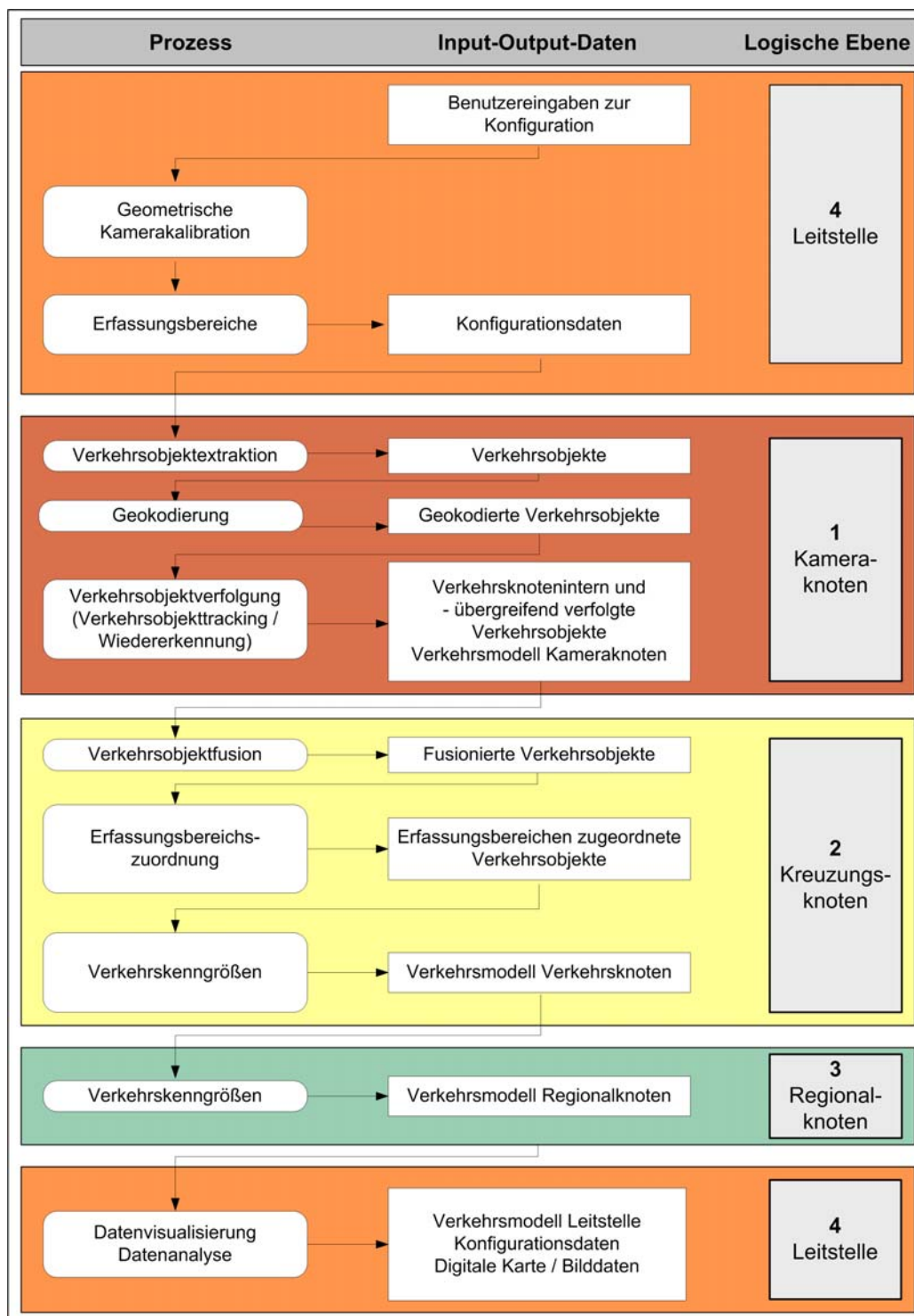


Abb. 9 Datenverarbeitungskette, Beispiel

Der zweite Aufgabenbereich des GIS beinhaltet die Ergebnisdarstellung auf unterschiedlichen Informationsebenen. Dazu werden entsprechende Darstellungsformen verwendet, mit denen die zeitliche und räumliche Dynamik des Verkehrsgeschehens abbildbar ist. Die Visualisierung erfolgt unter verschiedenen räumlichen, zeitlichen und inhaltlichen Gesichtspunkten. Im räumlichen Sinne erfolgt eine skalierte Darstellung anhand der Datenmosaike unterschiedlicher logischer Ebenen. Im zeitlichen Sinne bezieht sich die Darstellung auf die unterschiedlichen zeitlichen Aggregationsstufen. Unter inhaltlichen Aspekten werden unterschiedliche Verkehrskenngrößen visualisiert. Die Darstellung der Verkehrsobjektdaten erfolgt auf symbolischer Ebene. Außerdem können bei Bedarf Bilddaten von den Sensoren an die Leitstelle übertragen und dem Benutzer zur Verfügung gestellt werden.

Das GIS bildet außerdem ein Datenportal für zeitunkritische Verkehrsanwendungen im Bereich der Planung und Forschung. Die Visualisierung der Daten auf unterschiedlichen Informationsebenen erlaubt eine Analyse und Interpretation von Verkehrsprozessen durch einen Benutzer.

4.3 Datenmanagement

Die Verwaltung der Daten erfolgt durch ein komplexes Datenmanagement. Das Datenmanagement regelt die Datenverwaltung und den Datentransfer zwischen den einzelnen Prozessen und den logischen Ebenen.

Der primäre Datenstrom wird durch die Übertragung der Daten zwischen den einzelnen Prozessen der Verarbeitungskette erzeugt. Er ist von den tieferen auf höhere logische Ebenen gerichtet. Der sekundäre Datenstrom enthält in erster Linie Konfigurationsdaten. Er verläuft in entgegengesetzter Richtung.

Mit dem primären Datenstrom wird ein größeres Datenvolumen übertragen als mit dem sekundären Datenstrom. Den größten Anteil hat daran der Transfer des Bilddatenstroms von den Sensoren zur Leitstelle. Dadurch werden allerdings die Übertragungskapazitäten stark belastet und die Datentransfargeschwindigkeit innerhalb des Sensornetzwerks herabgesetzt. Die Echtzeitfähigkeit der Verarbeitungskette zur Berechnung von Verkehrskenngrößen aus dem Bilddatenstrom könnte dadurch eingeschränkt werden. Um das Datentransfervolumen zu verringern, werden die Bilddaten vor der Übertragung auf dem Kameraknoten komprimiert. Die Bilddatenkompression beansprucht jedoch einen erheblichen Teil der Rechnerleistungen. Sie konkurriert dabei mit den Bildverarbeitungsalgorithmen zur Verkehrsobjektextraktion und zur Wiedererkennung, falls die Prozesse auf dem gleichen Rechner durchgeführt werden. Dadurch würde die Echtzeitfähigkeit des Systems ebenfalls gefährdet. Die Kompression und Übertragung des Bilddatenstroms vom Kameraknoten zur Leitstelle erfolgt deshalb nicht permanent, sondern nur auf Anfrage durch einen Benutzer. Alternativ können die Bildverarbeitung und die Bilddatenkompression auf separaten Rechnern durchgeführt werden.

Die weiteren Bestandteile des primären Datenstroms beinhalten die skalaren Größen der extrahierten Verkehrsobjektdaten und die Verkehrskenngrößen. Das Datenaufkommen am Sensor hängt in diesen Bereichen wesentlich von der Größe des beobachteten Verkehrsraums, der Verkehrsbelastung und der Bildaufnahmefrequenz ab. Die aus einem Bild extrahierten Verkehrsobjektdaten und die Verkehrskenngrößen benötigen einen wesentlich geringeren Speicherbedarf als ein Bild.

Die Datenübertragung der Verkehrsobjekte und Verkehrskenngrößen ist damit unkritischer als im Fall der Bilddaten. Problematischer als die Datenübertragung ist die Haltung bzw. Speicherung der anfallenden Daten im dauerhaften Datenverarbeitungsbetrieb. Wie in den Anforderungen an das Datenmanagement beschrieben, ist bereits am Sensor von einer hohen Anzahl an Dateneinträgen in die Speichersysteme auszugehen. Die Datenverwaltung erfolgt mittels virtueller Speicher, Datenbanksystemen und Dateien. Bei einem kontinuierlichen Datenstrom wären die Speicherkapazitäten von Datenbanksystemen allerdings nach kurzer Zeit erschöpft. Außerdem würden sich mit zunehmendem Füllstand die Zugriffszeiten für Schreib- und Leseoperationen wesentlich verlängern und damit die Echtzeitfähigkeit gefährden. Um das zu verhindern, werden auf jeder logischen Ebene entsprechende Maßnahmen zum Entfernen der Daten aus dem Datenstrom durchgeführt. Die einzelnen logischen Ebenen verfügen über jeweils eigene Datenspeicher. Die Verarbeitungsoperationen der einzelnen Ebenen benötigen jeweils spezifische Daten. Den Prozessen werden deshalb nur diejenigen Daten zur Verfügung gestellt, die sie zur Weiterverarbeitung benötigen. Die Übertragung sämtlicher Daten zur Leitstelle ist deshalb nicht notwendig, der Datentransfer erfolgt damit selektiv. Die zeitliche Datenaggregation und die selektive Datenweitergabe an nachfolgende Prozesse führen innerhalb der Prozesskette zu einer Datenreduktion von tieferen zu höheren Ebenen. Die Datenpersistenz ist in diesem Zusammenhang auf den einzelnen Ebenen sehr unterschiedlich. Die selektive Weitergabe von Daten beginnt ab der Ebene des Verkehrsknotens.

Auf dem Verkehrsknoten werden die Daten der einzelnen Sensoren weiterverarbeitet und zu einem Datenmodell des Verkehrsknotens zusammengeführt. Aufgrund des hohen Datenaufkommens werden die Daten zunächst zwischengespeichert, Abb.10. Bei Überschreiten einer bestimmten Zeit- oder Füllstandsgrenze werden die Daten wieder entfernt. Die Datenverfügbarkeit ist damit in diesem Speicher zeitlich eng begrenzt. Die Daten werden anschließend in einen Datenarchivspeicher, z. B. in Form von Dateien, überführt, Abb.10. Dadurch stehen die Daten bei Bedarf nachträglich der Visualisierung und Analyse durch einen Benutzer auf Leitstellenebene zur Verfügung. Auf der Leitstelle erfolgt die Verwaltung regionaler und gesamtstädtischer Verkehrsmodelle sowie der Konfigurationsdaten. Als Datenspeicher wird wiederum eine Datenbank verwendet. Die Daten besitzen in diesem Speicher eine größere Persistenz. Konfigurationsdaten werden im Gegensatz zu den anderen Daten nicht zyklisch entfernt. Die Konfigurationsdaten sind solange gültig und verfügbar, bis sie von einem Benutzer verändert werden. Die Datenspeicher dienen gleichzeitig als Datenpool und Schnittstelle für Verkehrsanwendungen mit unterschiedlichen zeitlichen Anforderungen, Abb.10.

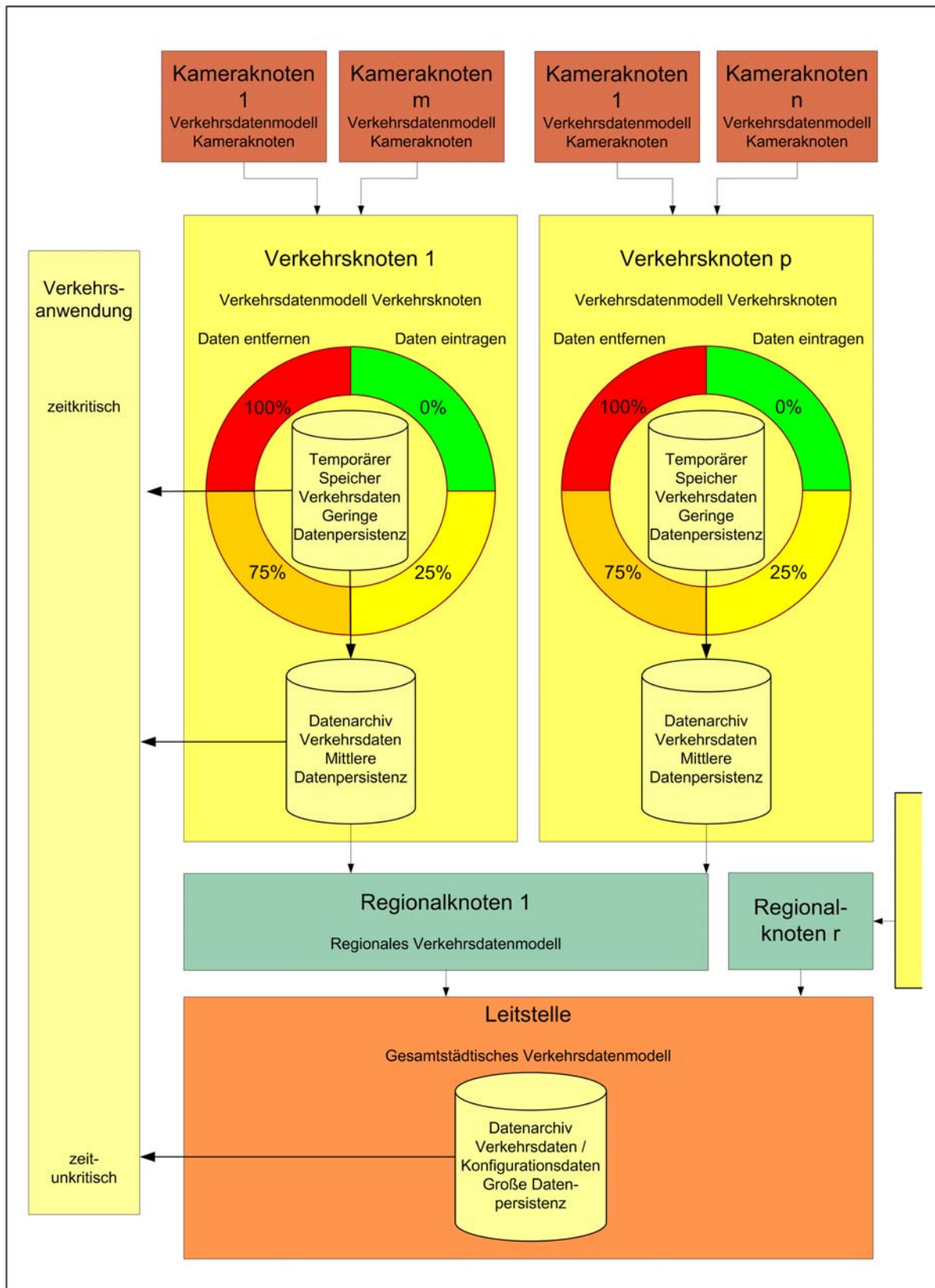


Abb. 10 Datenmanagement, Verteilung von Datenspeichern auf einzelnen logischen Ebenen, Beispiel

5 Umsetzung des Sensor- und Datenverarbeitungs-konzepts

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse zur Umsetzung des Sensor- und Datenverarbeitungskonzepts vorgestellt. Das Ziel der Aktivitäten bestand in der Beschreibung eines prinzipiellen Weges zur Realisierung des vorgestellten Sensor- und Datenverarbeitungskonzepts. Um dessen Funktionsfähigkeit zu testen, wurde eine Datenverarbeitungskette installiert. Sie beinhaltet, von der Bilddatenaufnahme durch die Sensoren bis zur Ableitung, Speicherung und Visualisierung von Verkehrsdaten, wesentliche Bestandteile des Sensor- und Datenverarbeitungskonzepts. Die Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit zeitkritischer Verkehrsanwendungen standen nicht im Vordergrund der Betrachtungen. An die einzelnen Module der Datenverarbeitungskette wurde deshalb auch nicht der Anspruch gestellt, den Datenstrom im Online-Betrieb, d. h. direkt im Anschluss an die Bildaufnahme durch die Sensoren, durchgängig automatisch zu verarbeiten. Die Datenverarbeitungskette wurde für die Verarbeitung von Archivdaten als Offline-Variante ausgelegt.

In den Kapiteln zur Umsetzung des Sensorkonzepts wird zunächst der experimentelle Teil der Arbeit vorgestellt. Er umfasst Ergebnisse des Einsatzes opto-elektronischer Sensoren zur Datenerhebung im Rahmen von Messkampagnen. In diesem Zusammenhang werden der Aufbau eines Messfeldes an einem Verkehrsknoten in Berlin-Adlershof, die verwendeten Sensorsysteme sowie die durchgeführten Messkampagnen zur Datenerhebung vorgestellt.

Im Anschluss werden die Komponenten zur Umsetzung des Datenverarbeitungskonzepts behandelt. Zunächst wird eine Übersicht der einzelnen Datenverarbeitungsmodule, Datenflüsse und der Datenverwaltung gegeben. Anschließend werden die einzelnen Verarbeitungsschritte detaillierter vorgestellt und mit den Anforderungen an das Messsystem in Beziehung gesetzt. Die Beschreibung der Verarbeitungsmodule orientiert sich an die Abfolge innerhalb des Datenverarbeitungskonzepts. Die Ausführungen gliedern sich dementsprechend in Bereiche zur Konfiguration, Datenverarbeitung und Ergebnisvisualisierung.

Die Umsetzung erfolgte in Anlehnung an das vorgestellte Datenverarbeitungskonzept. Datengrundlage bilden die im Rahmen von Messkampagnen erhobenen Daten. Die durchgeführten Arbeiten sind teilweise eng mit dem Projekt OIS verknüpft. Einige der dargestellten Prozesse sind in die Umsetzungen innerhalb des Projekts OIS eingeflossen.

5.1 Umsetzung des Sensorkonzepts

In den folgenden Abschnitten werden die praktischen Arbeiten zur Umsetzung des Sensor-konzepts und zur Datenakquisition vorgestellt. Die Ausführungen beginnen mit einer Über-sicht des Testfeldes. Anschließend werden die verwendeten Sensoren vorgestellt. Den Abschluss des praktischen Teils bildet eine kurze Auswahl der durchgeführten Messkampa-gnen zur Datenerhebung innerhalb des Testfeldes.

5.1.1 Testfeld

Zum Aufbau und zur Validierung der Datenverarbeitungskette ist die Verfügbarkeit von Bild- und weiterer Daten notwendig. Zur Bereitstellung der Daten wurde ein Testfeld einge-richtet. Als Testfeld dient ein Verkehrsknoten⁴¹ in Berlin-Adlershof, Abb.11. Der Knotenpunkt verbindet lokale Einzugsbereiche⁴² Berlins. Mit einem Grundriss von ca. 20 x 20m und jeweils ein bis zwei Fahrspuren je Fahrtrichtung weist er einen für großstädtische Verhältnisse eher kleinen Grundriss auf. Der Knotenpunkt ist weiterhin mit einer Lichtsignalanlage ausge-stattet. Innerhalb des Testfeldes kann damit prinzipiell der Einfluss der Lichtsignalanlage auf das Verkehrsgeschehen, z. B. Entstehung und Auflösung von Warteschlangen vor Haltelinien, in den Verkehrsdaten abgebildet werden.

Zur Erzeugung von Bilddaten unterschiedlicher Sensorstandorte und Blickrichtungen ist eine entsprechende Infrastruktur notwendig. Die Sensorstandorte sind je nach Aufnahmeplat-form fest oder variabel. Feste Standorte befinden sich auf dem Dach eines Gebäudes, Abb.11. Die Infrastruktur besteht aus mehreren wetterfesten Kameragehäusen, Rechnern und weiteren Systemkomponenten zum Datentransfer. Das Eckgebäude befindet sich in unmittelbarer Nähe des Knotenpunktes und erstreckt sich von der Wedegornstraße bis zur Rudower Chaussee über drei Seiten. Die Sensorstandorte sind über die gesamte Gebäudefront verteilt. Damit können alle Zu- und Abflussbereiche des Verkehrsknotens beobachtet werden. Von dem Gebäude aus können der gesamte Verkehrsknotenbereich sowie seine Zu- und Abflüsse bis ca. 500m aus unterschiedlichen Blickrichtungen aufgenommen werden, Abb.11. Die Höhe der Sensorstand-orte beträgt ca. 20-25m über dem Straßenraum. Sie liegt damit im oberen Bereich der Spanne, die für ein bodengebundenes System als realistisch angenommen wird. Aufgrund der ver-gleichsweise großen Aufnahmehöhe der Sensorstandorte auf dem Gebäude und der geringen Entfernung der Sensoren zum Verkehrsknoten kann eine vergleichsweise senkrechte Blickrich-tung zum Straßenraum realisiert werden. Außerdem können weitere mobile Sensorstandorte mit einem Messfahrzeug eingerichtet werden. Die Sensorstandorte, Blickrichtungen und Auf-nahmehöhen sind im Fall des Messfahrzeugs äußerst variabel. Die maximale Aufnahmehöhe ist jedoch gegenüber den Standorten auf dem Gebäude mit ca. 10m wesentlich geringer. Um den Anforderungen an die räumliche Datenverfügbarkeit gerecht zu werden, sind die Blick-richtungen zur Fahrbahn dementsprechend schräger als bei den anderen Standorten.

41. Rudower Chaussee - Wedegornstraße

42. Berlin-Adlershof, Berlin-Rudow, Berlin-Altglienicke

Diskussion

Innerhalb des Testfeldes können die Sensorstandorte und Blickrichtungen im Rahmen von Bilddatenerhebungen sehr variabel gewählt werden. Außerdem treten relativ geringe Sichtbehinderungen durch Bäume, Masten u. a. auf. Die Aufnahmebedingungen können entsprechend der geforderten räumlichen Datenverfügbarkeit an einem Verkehrsknoten als insgesamt günstig eingeordnet werden.



Abb. 11 Testfeld Verkehrsknoten Rudower Chaussee - Wededornstraße - Links: Luftbild mit Sensorstandorten und Blickrichtungen (Sensorstandort-ID 1-4), Rechts: Wetterfestes Kameragehäuse auf dem Dach eines Gebäudes (Verbundprojekt OIS, 2004)

5.1.2 Passpunktfeld

Die Charakterisierung der Verkehrskenngrößen soll entsprechend den Anforderungen an das Messsystem in einem Objektkoordinatensystem bzw. Weltmodell erfolgen. Dazu müssen die Pixelkoordinaten des Bildraums in den Objektraum eines übergeordneten Koordinatensystems transformiert werden. Voraussetzung ist die Kenntnis der geometrischen Zusammenhänge der unterschiedlichen Koordinatensysteme. Die dazu benötigten Transformationsparameter werden im Vorfeld des Datenverarbeitungsbetriebs im Rahmen der geometrischen Kamerakalibration ermittelt. Zur Berechnung dieser Größen werden Passpunkte mit bekannten Objektkoordinaten des Objektkoordinatensystems benötigt. Diese Punkte sollten eine hohe örtliche Persistenz aufweisen und in den Bilddaten sicht- und abgrenzbar sein. Die Punkte sollten weiterhin gleichmäßig innerhalb des Straßenraums verteilt sein. Damit wird gleichzeitig eine für den Kalibrationsprozess ausreichende Verteilung der Punkte innerhalb der Bilddaten gewährleistet. Die veränderlichen Abbildungsverhältnisse innerhalb eines Bildes müssen bei der Passpunktauswahl ebenfalls berücksichtigt werden. Die Größe hat neben der Verteilung der Passpunkte Einfluss auf die Genauigkeit der geometrischen Kamerakalibration. Je geringer die Ortsauflösung des Sensors ist, desto größer müssen die Passpunkte sein und desto ungünstiger sind die Auswirkungen auf die Genauigkeit der geometrischen Kamerakalibration.

Die Vermessung der Passpunkte ist mit unterschiedlichen geodätischen Verfahren möglich. Eine praktikable und gleichzeitig zeitsparende Variante ist der Positionierungsdienst NAVSTAR-GPS. Durch den Einsatz dieser Technologie sind die Anforderungen an eine möglichst großräumige Gültigkeit des geodätischen Bezugssystems erfüllt. Außerdem kann hinreichende Genauigkeit der Passpunktkoordinaten erzielt werden.

Das Positionierungssystem ist weltweit einsetzbar. Die Ortsgenauigkeit liegt je nach Auswertemethode zwischen mehreren Metern bis wenigen Zentimetern. NAVSTAR-GPS besteht zur Zeit aus 24 Satelliten und weltweit verteilten Fundamentalstationen, von denen aus die Satelliten beobachtet werden. Das Ergebnis der Beobachtungen sind die in einem erdfesten geozentrischen Koordinatensystem vorliegenden Bahnparameter der Satelliten [Krauss, 1996]. Die Positionsbestimmung erfolgt mit GPS-Empfängern über eine Auswertung von Laufzeitdifferenzen modulierter Trägersignale unterschiedlicher Frequenzen, die von den Satelliten ausgesendet werden. Zur Einmessung der Passpunkte bietet sich das differenzielle GPS bzw. DGPS an. Mit diesem Verfahren sind Genauigkeiten bis zu wenigen Zentimetern erreichbar. Dazu werden die Satellitensignale von zwei Stationen aus gleichzeitig ausgewertet und Korrekturwerte ermittelt. Eine Basisstation wird auf einem koordinatenmäßig bekannten Punkt installiert. Anhand der Objektkoordinaten dieses Punktes und der Satellitensignale werden für die mobile Empfängerstation Korrektursignale berechnet. Die Berechnung der Koordinaten kann in Echtzeit während des Messvorgangs oder nachträglich erfolgen. Ergebnis der Vermessungsarbeiten sind die geografischen und UTM-Koordinaten der Passpunkte. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung wird durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst. Diese beinhalten im Wesentlichen atmosphärische Einflüsse, Signalabschattungen, z. B. durch Gebäude, künstlich erzeugte Signalverfälschungen, Mehrfachreflektionen an Objekten und die Satellitenkonstellation. Im Zusammenhang mit der Satellitenkonstellation sind die Satellitenanzahl und ihre Verteilung im sichtbaren Himmelausschnitt von Bedeutung. Die Satellitenkonstellation ändert sich ständig und sollte bei der Auswahl des Vermessungszeitpunktes berücksichtigt werden.

Diskussion

Innerhalb des Verkehrsknotens sowie seinen Zu- und Abflüssen wurde ein umfangreiches Passpunktfeld mit ca. 100 Punkten angelegt. Die Vermessungsarbeiten wurden mittels Echtzeit-DGPS durchgeführt, die Koordinatenbestimmung der Passpunkte erfolgte direkt im Testfeld. Für die Auswahl der Punkte war deren gleichmäßige Verteilung und Wiedererkennbarkeit in den Bilddaten maßgeblich. Als Passpunkte wurden primär Abwasserdeckel und gut sichtbare Ecken von Straßenmarkierungen, z. B. Fahrbahnmarkierungen, verwendet. Die Messungen erfolgten während günstiger Satellitenkonstellationen, d. h. bei einer ausreichenden Anzahl und gleichmäßigen Verteilung sichtbarer Satelliten am Himmel. Die Basisstation wurde auf einem trigonometrischen Lage- und Höhenfestpunkt des Landesvermessungsamtes Berlin installiert. Die Koordinaten des Punktes wurden zur Korrektur der Satellitensignale verwendet. Die Genauigkeit des Systems wurde durch Koordinatenbestimmung eines zweiten Festpunktes mit dem mobilen Empfänger kontrolliert. Die Abweichung zwischen den Koordinaten des Lagefestpunktes und den Messwerten des DGPS-Empfängers betrug weniger als 10cm. Der Wert liegt unter den Anforderungen der Bildverarbeitung zur Verkehrsobjektextraktion bezüglich der Obergrenze der Ortsauflösung der Bilddaten von ca. 0.5m. Entsprechend den vorgeschlagenen geometrischen Eigenschaften der Sensoren und den Aufnahmeverhältnissen⁴³ ist in einigen Bereichen der Bildaufnahme theoretisch eine Subpixelgenauigkeit der Passpunktkoordinaten erreichbar. Die Genauigkeit der Passpunktkoordinaten entspricht in den Bildbereichen, in denen eine Wiedererkennung durchgeführt werden soll (GSD=10cm), etwa einem Pixel. Damit sollte die Passpunkteinmessung hinreichend genau sein. Die Kontrollmessung kann jedoch aufgrund der bereits erwähnten Faktoren, mit denen die Ortsgenauigkeit beeinflusst wird, nicht automatisch auf den gesamten Messvorgang übertragen werden.

43. Sensorstandort, Sensorhöhe über der Straße, Blickrichtung

Die Messgenauigkeit der einzelnen Passpunktkoordinaten unterliegt deshalb gewissen Schwankungen. Die Kontrollmessung gibt zumindest einen Anhaltspunkt bezüglich der zu erwartenden Genauigkeiten.

Das geodätische Bezugssystem und die Kartenprojektion wurden anhand der Koordinaten des Festpunktes festgelegt, auf dem die DGPS-Basisstation aufgebaut wurde. Die Passpunkte sind in dem geodätische Bezugssystem ETRS89 und der Kartenprojektion UTM eingemessen. Damit ist gleichzeitig das Weltmodell festgelegt. Sämtliche Daten mit Raumbezug, die im Verlauf der Verarbeitungskette abgeleitet werden, sind auf dieses System bezogen.

5.1.3 Sensoren

Die Ausstattung des Verkehrsknotens mit opto-elektronischen Sensoren erfolgte in Anlehnung an die vorgestellten Anforderungen an das Messsystem. Zur Datenerhebung wurden verschiedene Sensortechnologien kombiniert. Die Sensoren unterscheiden sich sowohl in den spektralen als auch in den geometrischen Eigenschaften. Sie decken entsprechend den Anforderungen an ein Messsystem die Spektralbereiche des sichtbaren Lichts und des thermalen Infrarot ab. Die Brennweiten der verwendeten Objektive variieren zwischen 4.3-16mm. Im zeitlichen Verlauf der durchgeführten Messkampagnen zur Datenerhebung kamen unterschiedliche Sensorkombinationen zum Einsatz. Die Sensoren waren als Einzelsysteme oder partiell als Netzwerk organisiert. Die Bildaufnahme erfolgt bei sämtlichen Sensoren asynchron. Die Reihenfolge der im folgenden vorgestellten Sensorkombinationen entspricht der zeitlichen Abfolge ihres Einsatzes in Messkampagnen zur Bilddatenerhebung.

Die erste Sensorkombination besteht aus mobilen Einzelsystemen, die nicht miteinander verbunden sind. Jedes System besteht aus einem Sensor, Rechner und GPS-Empfänger zur Bilddatensynchronisation. Bei den Sensoren handelt es sich um CCD-Flächensensoren (Abb.12), ein TIR-Bolometer (Abb.12 Rechts), sowie eine s/w- CCD-Zeilenkamera. Die Installation auf Videostativen ermöglicht einen, unabhängig von den festen Sensorstandorten, mobilen Einsatz der Sensoren innerhalb des Testfeldes. Die Bildwiederholrate der Flächensensoren wird durch die Digitalisierung von Analogsignalen und der Datenspeicherung auf ca. 4-6Hz limitiert. Zur Synchronisation der Bilddaten wird zusätzlich zu den Bilddaten ein Zeitstempel gespeichert. Dieser setzt sich aus dem Sekundentakt des GPS-Zeitsignals und dem zeitlichen Abstand in Millisekunden zusammen, der zwischen dem Eintreffen des GPS-Zeitsignals am Rechner und der Bildaufnahme liegt. Dieser Abstand wird durch die synchronisierten Systemuhren der Rechner bestimmt. Die Synchronisation der Systemuhren erfolgt manuell und stellt damit eine Fehlerquelle dar. Zwischen dem Empfang des GPS-Zeitsignals und dessen Bereitstellung als Zeitstempel für die Bilddaten am Rechner besteht außerdem ein zeitlicher Offset. Dieser Offset stellt eine weitere Fehlerquelle im Hinblick auf die Bilddatensynchronisation dar. Die Größe des Offsets ist nicht ohne weiteres präzisierbar.



Abb. 12 Sensoren - Links: VIS-Sensor (Sensor-ID 4, Tab.5), Mitte: VIS-Sensor (Sensor-ID 3, Tab.5), Rechts: IR-Sensor (Sensor-ID 5, Tab.5)

Die zweite Konfiguration ist als Sensornetzwerk ausgelegt. Mehrere RGB- CCD-Flächensensoren (Abb.13 Links) sind über eine 100MBit-Ethernet Netzwerkverbindung mit einem zentralen Rechner verbunden. Die Kommandierung der Sensoren und die Bilddatenspeicherung erfolgen zentral. Die Übertragungskapazität des Netzwerks und die zentrale Datenspeicherung limitieren die Bildwiederholrate auf ca. 5Hz. Die Systemzeit des Zentralrechners wird als Zeitstempel verwendet. Aufgrund der asynchronen Bildaufnahme ist auch bei dieser Variante eine nachträgliche Bilddatensynchronisation notwendig.



Abb. 13 Sensoren - Links: VIS-Sensor (Sensor-ID 2, Tab.5), Mitte: VIS-Sensor (Sensor-ID 1, Tab.5), Rechts: TIR-Bolometer (Sensor-ID 6, Tab.5)

Die dritte Sensorkonfiguration ist gleichzeitig das Demonstrationssystem des Projektes OIS. Es handelt sich wiederum um Einzelsysteme, bestehend aus jeweils einem Sensor und einem Rechner. Im Bereich des sichtbaren Lichts werden s/w CMOS-Sensoren eingesetzt, Abb.13 Mitte. Die Bildaufnahme und Datenspeicherung erfolgen ebenfalls dezentral. Die Datenübertragung erfolgt über CamLink, die Übertragungskapazitäten sind gegenüber der ersten und zweiten Variante wesentlich höher. Die CMOS-Technologie und die Übertragungsinfrastruktur erlauben hohe Bildwiederholraten. Außerdem wird ein TIR-Bolometer mit spezieller Elektronik zur schnellen Datenübertragung innerhalb der Sensorhardware verwendet, Abb.14 Rechts.

Diskussion

Mit den vorgestellten Sensorkonfigurationen sind die Anforderungen an die spektrale Auflösung der Sensoren erfüllt. Die geforderte zeitliche Auflösung von 5-6Hz ist mit den Systemen prinzipiell realisierbar. Die erste und zweite Konfiguration werden in diesem Punkt jedoch an ihre Grenzen geführt. Die Kapazitäten der dritten Konfiguration werden dagegen im Punkt der Bildwiederholrate nicht ausgeschöpft.

Die Bilddatensynchronisation unterschiedlicher Sensoren erfordert die Vergabe von Zeitstempeln. Voraussetzung für eine direkte Synchronisation im Zuge der Bildaufnahme ist die externe Triggerung der Bildaufnahme aller Sensoren durch einen zentralen Taktgeber. Aufgrund der asynchronen Bildaufnahme sind im Anschluss an die Bildaufnahme Maßnahmen zur Synchronisation erforderlich. Eine Möglichkeit ist die Zuordnung der Bildaufnahmen zu einem fest vorgegebenen Zeitraster.

Die geometrischen Eigenschaften der Sensoren entsprechen den vorgeschlagenen Konfigurationen, Abb.5. Die Anforderungen an die Ortsauflösung und die abzubildenden Bereiche des Straßenverkehrsraums an einem Knotenpunkt sind damit prinzipiell erfüllbar.

Der zeitliche und personelle Aufwand zur Installation der Sensorinfrastruktur an einem einzelnen Knotenpunkt ist insgesamt sehr hoch. Das betrifft in erster Linie die Einrichtung fester Sensorstandorte, da erstens besondere Anforderungen an die Wetterfestigkeit gestellt werden und zweitens die Übertragungswege zwischen Sensor und Rechner wesentlich größer als bei mobilen Systemen sind. Die Infrastruktur zur Datenübertragung ist außerdem ein zusätzlicher Kostenfaktor stationärer Systeme. Dieser Punkt ist bei CamLink besonders kritisch. Die Installation mobiler Systeme vor Ort ist dagegen weniger zeitintensiv. Die einzelnen Sensoren der zuerst beschriebenen Konfiguration können relativ unkompliziert mit Videostativen fixiert werden. Allerdings müssen sie im Vorfeld des Einsatzes getestet werden. Ein Nachteil mobiler Systeme die aufgrund mechanischer Beanspruchungen geringere Zuverlässigkeit während des Einsatzes in Messkampagnen. Nach Beendigung der Bildaufnahme müssen diese Systeme außerdem immer wieder deinstalliert werden. Mobile Systeme sind deshalb für kurzfristige Einsätze an unterschiedlichen Standorten geeignet. Zur kontinuierlichen stationären Beobachtung des Verkehrsraums sind sie allerdings ungeeignet.

Angesichts des hohen infrastrukturellen Aufwands erscheint für zukünftige Messsysteme eine kabellose Datenübertragung wesentlich kostengünstiger und darüberhinaus eleganter. Der größte Nachteil kabelloser Datenübertragungstechnologien besteht in der geringeren Datentransferrate. Ihr Einsatz erfordert eine Auswertung der Bilddaten direkt am Sensor. Die Übertragung der aus den Bilddaten extrahierten Verkehrsobjektdaten und der Verkehrskenngrößen dürfte dagegen unkritisch sein. Eine kontinuierliche Übertragung des Bilddatenstroms wäre dagegen nicht oder nur eingeschränkt möglich.

Die jeweiligen Stärken und Schwächen der vorgestellten Sensorkonfigurationen sind in Tab.4 bewertet. Die komplexen Anforderungen und Aufgabenstellungen eines operationell einsetzbaren Messsystems zur Verkehrsdatenerfassung sind von den einzelnen Varianten in bestimmten Punkten erfüllbar. In dem aktuellen Zustand sind die Systeme insgesamt jedoch noch nicht für einen operationellen Einsatz zur Verkehrsdatenerfassung geeignet. Die Sensorsysteme sind jedoch zur Datenerhebung im Rahmen der Entwicklung der Datenverarbeitungskette eines Messsystems durchaus verwendbar.

Variante	Bildwiederholrate	Pixelanzahl	Zeitsynchronisation	Datenübertragungskapazität	Sensorvernetzung	Farbe
1	0	0	0	0	-	-
2	0	+	0	0	+	0
3	+	+	0	+	-	-

Tab. 4 Bewertung der VIS-Sensorkonfigurationen bezüglich ihrer Eignung zur Verkehrsdatenerhebung - (- = negativ, + = positiv, 0 = ausreichend)

5.1.4 Messkampagnen zur Bilddatenerhebung

Die Entwicklung und Validierung der Komponenten einer durchgehenden Datenverarbeitungskette erfordert die Verfügbarkeit von Bildaufnahmen des Straßenverkehrs. Innerhalb des Testgebietes wurde im Rahmen von Messkampagnen entsprechendes Datenmaterial erhoben. Als Messsysteme dienten die bereits vorgestellten Sensoren. Der Messaufbau und die Durchführung der Experimente erfolgten in Anlehnung an die Anforderungen an ein opto-elektronisches Messsystem zur Verkehrsdatenerhebung.

Die Bildverarbeitung entscheidet maßgeblich über die Zuverlässigkeit des Messsystems. An die Detektionssicherheit werden deshalb sehr hohe Anforderungen gestellt. Zur Entwicklung von Algorithmen, mit denen das Verkehrsgeschehen operationell zuverlässig erfassbar ist, werden entsprechende Bildsequenzen benötigt. Sie müssen ein breites Spektrum unterschiedlicher Beleuchtungs-, Witterungs- und Verkehrsbedingungen abdecken. Die Umwelteinflüsse sind jedoch kontinuierlich veränderlich. Das erfordert einerseits die Auswahl repräsentativer Szenen, z. B. Tag- und Nachtaufnahmen, Dämmerung, unterschiedliche Verkehrsbelastungen, die im Rahmen von Messkampagnen zu erheben sind. Auf der anderen Seite müssen Sonderfälle berücksichtigt werden, z. B. dichter Schneefall, Hagel, Starkregen, Nebel, Verkehrsunfälle. In diesem Zusammenhang wurde ein Katalog definierter Umweltbedingungen erstellt, die es im Zuge von Messkampagnen zu erfassen galt. Fragen der räumlichen Datenverfügbarkeit sollten entsprechend den formulierten Anforderungen an das Messsystem ebenfalls in den Messkampagnen berücksichtigt werden. Dazu wurden Aufnahmen schräg zur Fahrbahn mit einem oder gleichzeitig mit mehreren Sensoren durchgeführt. Im Verlauf der Messkampagnen entstand ein umfangreiches und dokumentiertes Datenarchiv. Das Bildmaterial stellte eine wesentliche Datengrundlage zur Entwicklung der einzelnen Datenverarbeitungskomponenten dar.

Diskussion

Der Aufwand zur Bilddatenerhebung wird insgesamt als sehr hoch bewertet. Das beinhaltet auf der einen Seite die bereits angesprochenen Arbeiten zur Installation der Sensoren und andererseits den logistischen Aufwand bei der Durchführung von Messkampagnen. Während die Installation fester Sensorstandorte gegenüber mobilen Standorten wesentlich zeitaufwendiger ist, kehrt sich das Verhältnis beim logistischen Aufwand im Rahmen der Messung um.

Die simultane Durchführung von Experimenten mit spektral und geometrisch unterschiedlich auflösenden Sensorsystemen ermöglichte eine Bewertung bezüglich ihrer Eignung zur Verkehrsobjektextraktion. Der gleichzeitige Einsatz von VIS- und IR-Sensoren ermöglichte in diesem Zusammenhang die Beurteilung spektral unterschiedlich auflösender Systeme bei unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen. VIS-Sensoren sind bei guten Beleuchtungsverhältnissen in ihren Abbildungseigenschaften den IR-Sensoren überlegen. Bei Dunkelheit sind mit VIS-Sensoren lediglich künstliche Lichtquellen, z. B. Fahrzeugscheinwerfer oder Straßenbeleuchtungen, erkennbar. Dagegen sind aufgrund der thermischen Unterschiede bei Dunkelheit die Strukturen des Verkehrsraums und der Verkehrsteilnehmer in den TIR-Bilddaten deutlich erkennbar, Abb.14. Diese Strukturen können von der Bildverarbeitung verwendet werden, um Verkehrsobjekte zu identifizieren und zu charakterisieren. TIR-Sensoren sind deshalb für die Verkehrsdatenerhebung im Dunkeln wesentlich geeigneter und wären damit eine vielversprechende Alternative bzw. Ergänzung zu den bislang zur Verkehrsdatenerfassung eingesetzten VIS-Flächensensoren.

Aufnahmen unterschiedlicher Sensorstandorte und Blickrichtungen schräg zur Fahrbahn, bei denen sich Bilddaten partiell überlappen, wurden allgemein zur Ableitung räumlich übergeordneter Verkehrsmodelle und speziell zur Datenfusion auf der Verkehrsknotenebene benötigt. Außerdem wurden Messungen quer zur Fahrbahn durchgeführt. Die Anforderungen an die räumliche Datenverfügbarkeit sind im letzten Fall zwar nicht erfüllbar. Anhand der Aufnahmen können jedoch Zeilensensoren bezüglich ihrer Eignung für bestimmte Teilaspekte der Verkehrsdatenerhebung bewertet werden. Die geometrische Auflösung solcher Systeme ist bis ca. Faktor 10 höher als bei Flächensensoren, Abb.16. Die geometrischen Eigenschaften der Verkehrsobjekte können dadurch wesentlich detaillierter abgebildet und durch die Bildverarbeitung ausgewertet werden. Verkehrsobjekte können im Vergleich zu Flächensensoren mit Zeilensensoren detaillierter charakterisiert werden. Dieses Aufnahmeverfahren wäre als Ergänzung oder Alternative zur verkehrsknotenübergreifenden Wiedererkennung mit Flächensensoren denkbar. Außerdem können Zeilensensoren verwendet werden, um die Geschwindigkeit von Verkehrsobjekten exakt zu bestimmen. Bei Zeilensensoren werden Verkehrsobjekte durch ihre Bewegung abgebildet. Je nach Geschwindigkeit werden die Objekte gestreckt, gestaucht oder exakt dargestellt. Die Geschwindigkeit kann über Objektmerkmale ermittelt werden, deren ursprüngliche Form, z. B. Räder, bekannt sind.

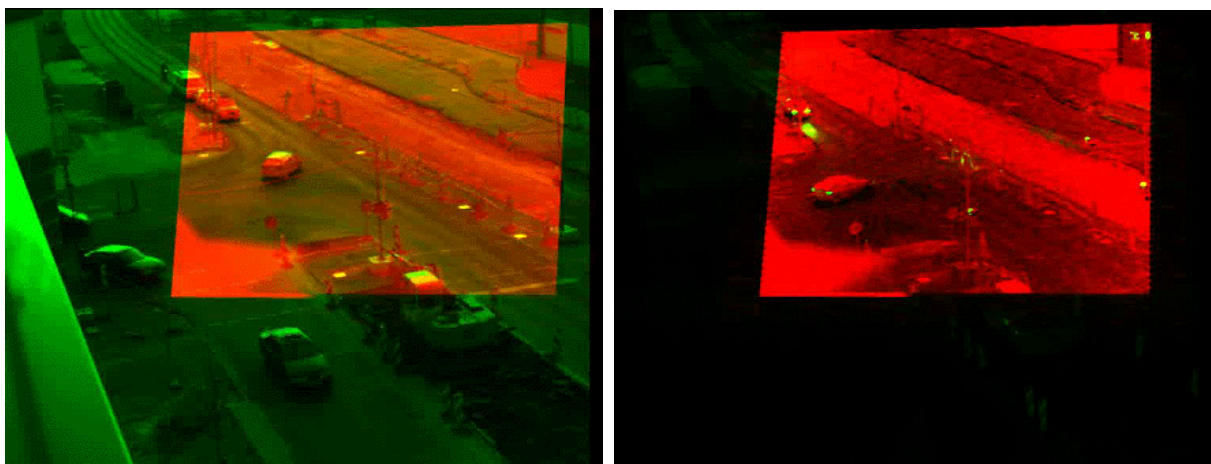


Abb. 14 Datenfusion unterschiedlicher Sensortechnologien - VIS-Sensor (Sensor-ID 3, Tab.5) (grün) und IR-Bolometer (Sensor-ID 5, Tab.5) (rot), Links: Tagaufnahme. Rechts: Nachtaufnahme



Abb. 15 Bilddatensynchronisation, Unterschiedliche Sensorstandorte und Blickrichtungen längs zur Straße - Links oben: VIS-Sensor (Sensor-ID 4, Tab.5), Rechts oben: VIS-Sensor (Sensor-ID 3, Tab.5), Links unten: VIS-Sensor (Sensor-ID 4, Tab.5), Rechts unten: IR-Bolometer (Sensor-ID 5, Tab.5)

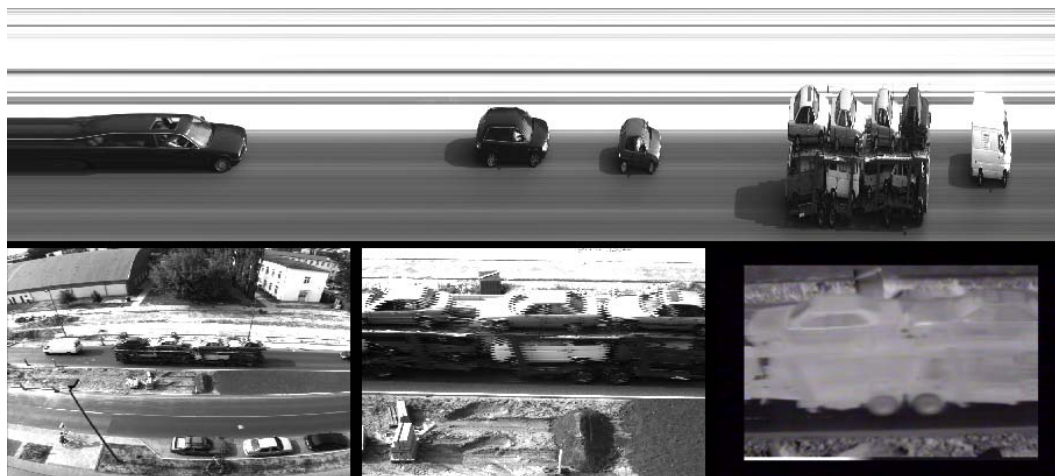


Abb. 16 Bilddatensynchronisation, Unterschiedliche Sensorstandorte und Blickrichtungen quer zur Straße - Oben: Zeilenkamera (Sensor-ID 6, Tab.5), Links unten: VIS-Sensor (Sensor-ID 3, Tab.5), Mitte unten: VIS-Sensor (Sensor-ID 3 Tab.5), Unten rechts: IR-Bolometer (Sensor-ID 5, Tab.5).

5.2 Umsetzung des Datenverarbeitungskonzepts

Die nachfolgenden Ausführungen sind den Arbeiten zur Umsetzung des Datenverarbeitungskonzepts gewidmet. In den Kapiteln Datenverarbeitungs- und Datenflussmodell wird zunächst ein Überblick über die einzelnen Bestandteile des realisierten Datenverarbeitungskonzepts gegeben. Das umfasst die Einordnung der einzelnen Teilbereiche in das Konzept der logischen Ebenen, das Zusammenspiel der Prozesse und die einzelnen Datenflüsse, mit denen Daten zwischen den Prozessen und logischen Ebenen transportiert werden. Die von einzelnen Verarbeitungsmodulen erzeugten Daten werden im Verlauf der Ausführungen konkretisiert und die Organisation der Daten in einem Datenbankmodell zur Datenverwaltung erläutert. Im Anschluss werden die einzelnen Datenverarbeitungsprozesse beschrieben und die Ergebnisse diskutiert. Die Datenverarbeitungsmodule gliedern sich in verschiedene eigenständige Teilbereiche. Ein Bereich beinhaltet Themenkreise der Konfiguration, der Datenvisualisierung und der interaktiven Datenanalyse durch einen Benutzer. Diese Komponenten bilden zusammen den umgesetzten GIS-Teil des Datenverarbeitungskonzepts. Auf der anderen Seite stehen die Algorithmen der Datenverarbeitung, mit denen aus dem Strom archivierter Daten in einer aufeinanderfolgenden Prozesskette Verkehrskenngrößen im Offline-Betrieb abgeleitet werden. Die Arbeiten an den einzelnen Komponenten sind inhaltlich unterschiedlich stark akzentuiert. Der Fokus liegt einerseits auf den GIS-spezifischen Modulen zur Konfiguration von Verarbeitungsprozessen der Datenverarbeitung sowie zur Datenvisualisierung und Datenanalyse. Der zweite Schwerpunkt besteht in der Ableitung von Verkehrskenngrößen. Bildverarbeitungsrelevante Themen zur Verkehrsanalyse sind dagegen nicht primär Gegenstand der Betrachtungen. Das betrifft die Datenextraktion durch die Bildverarbeitung, das Verkehrsobjekttracking und die Verkehrsobjektdatenfusion.

Die Realisierung der Datenverarbeitungsmodule erfolgte überwiegend durch eigener Softwareentwicklungen. Verfügbare kommerzielle und frei verfügbare Software kam dagegen nur vereinzelt zum Einsatz. Die Gründe liegen in den speziellen Anforderungen und Komplexität der Datenverarbeitung. Aufgrund der vielschichtigen Aufgabenstellungen müssten mehrere Softwareanwendungen eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang sind in erster Linie Bildverarbeitungssysteme⁴⁴ und GIS zu nennen. Solche Systeme können die speziellen Anforderungen bezüglich automatischer Datenverarbeitung und Visualisierung jedoch nur eingeschränkt erfüllen. Darüberhinaus bieten sie keine oder eine sehr eingeschränkte automatisierbare Interoperabilität⁴⁵. Eine vollständige Automatisierung ist für die Durchgängigkeit der Verarbeitungskette jedoch entscheidend.

Als Programmiersprache wurde IDL⁴⁶ verwendet. IDL ist eine interpreterbasierte Hochsprache. Sie verfügt über eine Vielzahl vordefinierter Funktionen, die für unterschiedlichste Datenverarbeitungs- und Visualisierungsaufgaben verwendbar sind. Der Programmieraufwand wird dadurch im Vergleich zu anderen Sprachen wesentlich verringert. Außerdem verfügt IDL über ODBC⁴⁷-Schnittstellen zur Anbindung an gebräuchliche Datenbanksysteme. IDL eignet sich jedoch nicht für Datenverarbeitungsaufgaben zeitkritischer Anwendungen mit hohen Echtzeitanforderungen. Diese Systemanforderungen waren jedoch bei der Zielstellung nicht von Bedeutung.

44. zur Verkehrsobjektextraktion und Georeferenzierung

45. d. h. Datenportierung zwischen einzelnen Systemen

46. Interactive Data Language

47. Open Database Connection

5.2.1 Datenverarbeitungs- und Datenflussmodell

Die umgesetzten Bestandteile des Datenverarbeitungskonzepts werden durch das folgende Datenverarbeitungs- und Datenflussmodell beschrieben, Abb.17. Das Schema zeigt die einzelnen Verarbeitungsprozesse und deren Zugehörigkeit zu den logischen Ebenen des Datenverarbeitungskonzepts. Die Datenflüsse zwischen den Prozessen und Ebenen sind durch Verbindungslinien gekennzeichnet. Der Datenaustausch zwischen den einzelnen Modulen erfolgt entweder uni- oder bidirektional. Die Richtung des Datenflusses ist entsprechend gekennzeichnet.

In dem Modell sind drei grundsätzlich verschiedene Verarbeitungsbereiche vereint. Diese gliedern sich einerseits in den Teil der Datenverarbeitungskette, der als Datenverarbeitung bezeichnet wird. Dort erfolgt die automatische Verarbeitung von Daten durch geeignete Algorithmen. Auf der anderen Seite stehen Module zur Konfiguration, zur Datenvisualisierung und interaktiven Datenanalyse. Diese Module werden unter der Bezeichnung GIS zusammengefasst. Das GIS dient der Interaktion zwischen dem Benutzer und dem System. Es besitzt damit eine wichtige Schnittstellenfunktion. Die Verwaltung der Daten erfolgt in entsprechenden Datenspeichern. Sie dienen gleichzeitig dem Datenaustausch zwischen den Modulen der Datenverarbeitung und dem GIS.

Die Datenverarbeitung ist im Datenverarbeitungskonzept als durchgängig automatisierte Prozesskette vorgesehen. Das beinhaltet die Berechnung von Verkehrskenngrößen aus dem Bilddatenstrom durch entsprechende Algorithmen über mehrere Schritte. Die implementierten Verarbeitungsprozesse sind den logischen Ebenen des Kameraknotens und des Verkehrsknotens zuzuordnen, Abb.17. Die Abfolge der umgesetzten Prozesskette und die abgeleiteten Daten sind in Abb.18-19 dargestellt. Die hervorgehobenen Datentypen sind das Ergebnis des jeweils aktuellen Verarbeitungsprozesses. Da zur Entwicklung und zum Test der Module eine relativ geringe Anzahl an Daten ausreicht, ist erstens die Datenübergabe an nachfolgende Prozesse nur sehr begrenzt selektiv, d. h. fast alle Daten werden bis zum Ende der Prozesskette weitertransportiert. Im Verlauf der Datenverarbeitung steigen deshalb die Anzahl unterschiedlicher Datentypen. Zweitens werden die abgeleiteten Daten nicht nach einer bestimmten Zeit aus den Datenspeichern entfernt, wie es in dem Datenverarbeitungskonzept vorgesehen ist. Die zunehmende Anzahl an Datentypen impliziert damit gleichzeitig ein steigendes Datenaufkommen im Verlauf der Datenverarbeitung. Aufgrund der Verwendung von kleineren Datensätzen sind Fragen des Datenvolumens und der Datenpersistenz damit von untergeordneter Bedeutung.

In der Umsetzung ist die Prozesskette der Datenverarbeitung zweigeteilt, Abb.17. Die Aufteilung beruht auf den unterschiedlichen Verfahren zur Erzeugung der Daten im ersten Teil der Verarbeitung. Im ersten Teil werden die Verkehrsobjektdaten generiert. Er umfasst Prozesse des Kamera- und Verkehrsknotens. Die Erzeugung der Daten beruht auf manuellen Auswertungen von Bilddaten, Datensimulationen auf der Basis realer Fahrspurgeometrien und Algorithmen, die innerhalb des Projektes OIS zur automatischen Datenverarbeitung auf Basis der Bildverarbeitung entwickelt worden sind. Obwohl die einzelnen Methoden zur Datengenerierung im ersten Teil sehr unterschiedlich sind, beruhen sie doch in allen Fällen auf realen Bilddaten. Zunächst werden die Verkehrsobjekte extrahiert. Die Verkehrsobjekte weisen hinsichtlich der Art und Anzahl ihrer Merkmale je nach Verfahren partiell Unterschiede auf. Bestimmte Merkmale werden z. B. bei der Verkehrsobjektextraktion, ausschließlich durch die Bildverarbeitung erzeugt. Die weitere Verarbeitung der Verkehrsobjektdaten beinhaltet die Verortung der Position in einem Weltmodell im Rahmen der Geokodierung und die Verfolgung der Verkehrsobjekte durch das Verkehrsobjekttracking, Abb.18.

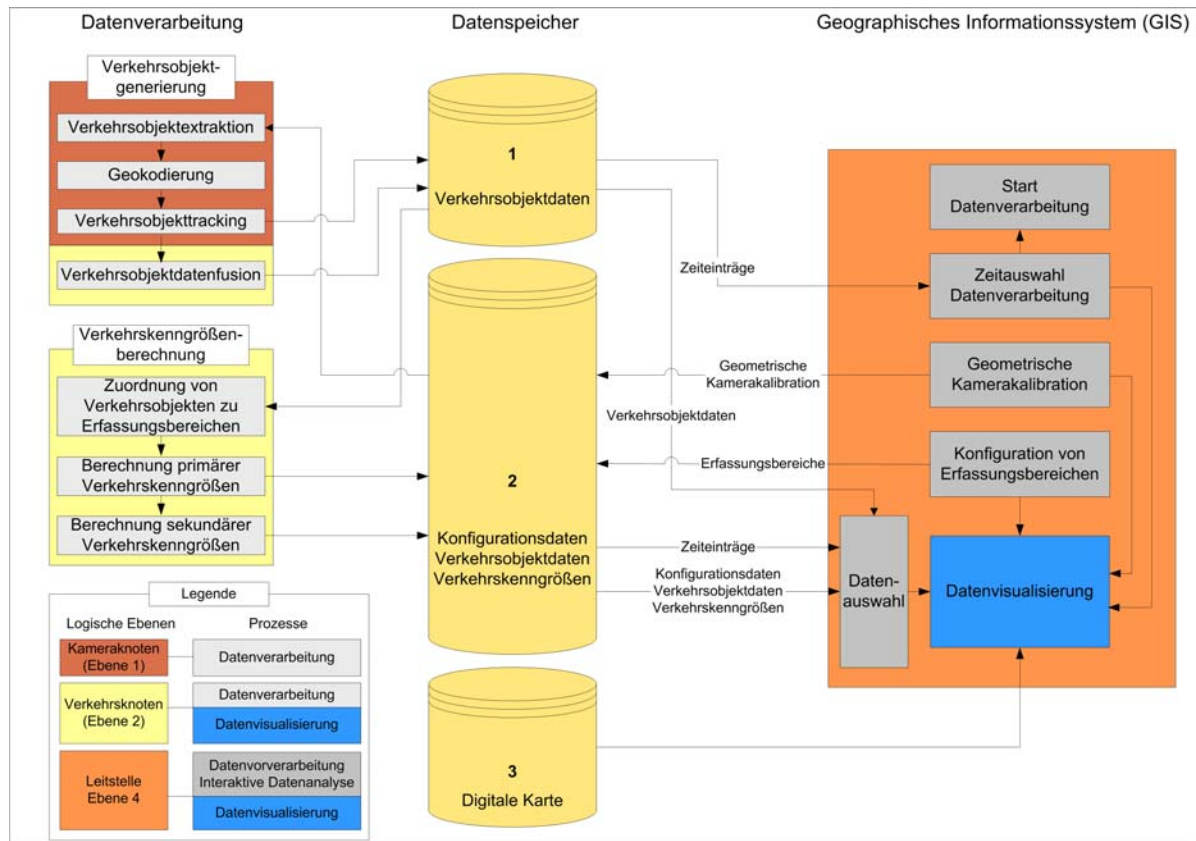


Abb. 17 Datenverarbeitungs- und Datenflussmodell

Die Durchführung der Verkehrsobjektfusion ist von dem Verfahren zur Datenerzeugung abhängig. Sie setzt räumliche Überlappung der Bildbereiche unterschiedlicher Sensorstandorte voraus. Diese Bedingung ist nicht in jedem Verfahren zur Verkehrsobjektgenerierung erfüllt. Die Verkehrsobjektfusion wird deshalb nicht bei jedem Verfahren zur Datenerzeugung durchlaufen. Aufgrund der Unterschiede bezüglich der Datenerzeugung sind die Abbildungen 18-19 als Synthese der Prozesse und Datentypen verschiedener Vorgehensweisen der Datenverarbeitung anzusehen. Die Ergebnisse der Objektdatengenerierung werden archiviert, Abb.17. Damit wird dieser Teil der Datenverarbeitung abgeschlossen. Der Begriff Datenspeicher wird in diesem Zusammenhang als Sammelbegriff für unterschiedliche Speichermedien verwendet. Je nach Verfahren zur Objektdatengenerierung werden die Ergebnisse in einer Datenbank oder in Dateien verwaltet. Im Fall der automatischen Datenerzeugung innerhalb des Projektes OIS werden Datenbanken verwendet. Die Ergebnisse der Simulation und der manuell erzeugten Daten werden dagegen in Dateien verwaltet.

Nach Beendigung der Objektdatengenerierung sind die Verarbeitungsstände im Hinblick auf die durchlaufenen Prozesse und Datentypen nicht völlig identisch. Die Bereitstellung der benötigten Daten zur Weiterverarbeitung im zweiten Teil der Datenverarbeitung wird jedoch in jedem Verfahren gewährleistet. Die unterschiedlichen Verarbeitungsstände beziehen sich einerseits auf die erzeugten Datentypen und andererseits auf die Datenqualität. Bei manuell erzeugten und simulierten Daten werden die Verkehrsobjekte korrekt extrahiert und weiterverarbeitet, d. h. es handelt sich um ideale Datensätze. VerkehrsobjektDaten, die durch Bildverarbeitungs-Algorithmen erzeugt und automatisch weiterverarbeitet werden, besitzen diese Eigenschaft nicht.

Die Qualität der Verkehrsobjektdetektion ist von Umweltbedingungen⁴⁸ und den verwendeten Bildverarbeitungsalgorithmen abhängig. Eine 100 prozentig korrekte Detektion aller Verkehrsobjekte durch die Bildverarbeitung ist deshalb unrealistisch. Vielmehr ist davon auszugehen, dass Verkehrsobjekte mitunter gar nicht oder fehlerhaft erfasst werden. Das bedeutet eine Einschränkung der Datenqualität im Vergleich zur manuellen und simulierten Verkehrsobjektgenerierung. Verkehrsobjekte können plötzlich im Bild 'verschwinden' oder sie werden nach einer gewissen Zeit erneut detektiert. Durch die Verkehrsobjektdetektion erzeugte fehlerhafte oder fehlende Daten haben Auswirkungen auf die nachfolgenden Prozesse. Eine kontinuierliche Verfolgung der Verkehrsobjekte, vom Anfang bis zum Ende ihrer Anwesenheit im Abbildungsbereich eines Sensors kann deshalb auch nicht gewährleistet werden. Bei unvollständigen Daten können die Trajektorien, d. h. die zurückgelegten Wege, der Verkehrsobjekte im Abbildungsbereich unvermittelt abreißen, beginnen oder in mehrere Segmente geteilt werden. Im Verlauf des Verkehrsobjekttracking kann es auch zu falschen Zuordnungen der Verkehrsobjekte kommen. Die Trajektorien widerspiegeln dann nicht den Weg eines Verkehrsobjekts sondern sind ein Komposit der Wege mehrerer Verkehrsobjekte im Verlauf ihrer Detektion. Falsche Zuordnungen von Verkehrsobjekten könnten auch bei der Verkehrsobjektfusion eintreten. Die auf der Basis von Bildverarbeitungsalgorithmen erzeugten Datensätze sind demzufolge in unterschiedlichem Maße unvollständig und fehlerhaft. Die Verarbeitungsprozesse der Datenverarbeitungskette müssen auch mit solchen Daten umgehen können.

Der zweite Abschnitt der Datenverarbeitung beinhaltet die Verkehrskenngrößenberechnung. Die Verarbeitungsprozesse sind ausschließlich auf der logischen Ebene des Verkehrsknotens verteilt. Die Berechnung der Verkehrskenngrößen ist im Gegensatz zur Verkehrsobjekterzeugung durch eine einheitliche Vorgehensweise gekennzeichnet. Die Auswahl der Daten erfolgt über Zeitintervalle. Die Festlegung der Intervallgrenzen ist im Rahmen der Konfiguration durch einen Benutzer auf Leitstellenebene vorzunehmen, Abb.17. Die einzelnen Datenverarbeitungsschritte auf dem Verkehrsknoten beinhalten zunächst die Zuordnung der Verkehrsobjekte zu Erfassungsbereichen. Die Erfassungsbereiche müssen ebenfalls im Zuge der Konfiguration durch einen Benutzer festgelegt werden, Abb.17. Im Anschluss an die Zuordnung erfolgt die Berechnung der Verkehrskenngrößen. Die Einteilung der Kenngrößen erfolgt sowohl unter zeitlichen als auch unter weiteren Aspekten. Unter zeitlichen Gesichtspunkten werden primäre und sekundäre Verkehrskenngrößen abgeleitet. Das beinhaltet unterschiedliche Stufen der zeitlichen Datenaggregation. Eine weitere Untergliederung erfolgt in verkehrsobjekt- erfassungsbereichs- und fahrspurbezogene Kenngrößen.

Der zweite große Themenkomplex des Datenverarbeitungs- und Datenflussmodells beinhaltet Module zur Interaktion zwischen dem System und einem Benutzer auf Leitstellenebene, Abb.17. Dieser Bereich des Systems wird als der GIS zusammengefasst. In diesem Bereich erschließen sich neue Betätigungsfelder für GIS, die in diese Arbeit konzipiert und realisiert worden sind. Sie beinhalten erstens Aufgaben zur Konfiguration von Prozessketten für automatisierte Datenverarbeitungssysteme, in diesem Fall für ein opto-elektronisches Sensorsystem zur Verkehrsdatenerfassung. Im Rahmen der Konfiguration sind die geometrische Kamerakalibration durchzuführen, Erfassungsbereiche für die Verkehrskenngrößenberechnung festzulegen sowie weitere Randbedingungen⁴⁹ für die Datenverarbeitung zu definieren, Abb.17. Weitere Aufgabengebiete betreffen die Ergebnisvisualisierung und die interaktive Datenanalyse.

48. Verkehrs-, Beleuchtungs- und Witterungsbedingungen

49. z. B. Datenauswahl für die Verkehrskenngrößenberechnung

Die beiden letzten Punkte sind eigentlich klassische GIS-Aufgabenbereiche. Die Zeitkomponente spielt zur Verarbeitung und Darstellung von Daten mit räumlichem Bezug bei herkömmlichen GIS derzeit allerdings noch eine untergeordnete Rolle.

Die speziellen Anforderungen an die Funktionalität der Module verhinderten den Einsatz klassischer GIS-Technologie. Die Umsetzung erfolgte deshalb mit Ausnahme der Arbeiten zur Bestimmung der geometrischen Kamerakalibration anhand eigener Softwareentwicklungen. Im Bereich GIS wurden Werkzeuge zur Konfiguration der Datenverarbeitungskette und zur Ergebnisdarstellung unterschiedlicher Informationsebenen mit besonderer Berücksichtigung der Zeitkomponente realisiert. Mit den Visualisierungswerkzeugen sind Verkehrsprozesse für einen Benutzer nachträglich in ihrer zeitlichen Dynamik erfass- und interpretierbar.

Zwischen den beiden vorgestellten Themenkomplexen (Datenverarbeitung und GIS) des umgesetzten Systems befinden sich die Datenspeicher, Abb.17. Sie dienen der Datenverwaltung und bilden gleichzeitig eine gemeinsame Datenaustauschzone für die Datenverarbeitungs- und GIS-Module. Die drei Speichereinheiten beinhalten unterschiedliche Daten und erfüllen spezielle Aufgaben. Datenspeicher ist ein Sammelbegriff für verschiedene Speichermedien (Datenbanksysteme und Dateien), in denen die Verkehrsobjektdaten vorgehalten werden. Die Verkehrsobjekte sind Eingangsdaten zur Berechnung der Verkehrskenngrößen auf der logischen Ebene des Verkehrsknotens. Die Datenbank bildet das Kernstück zur Verwaltung der Daten, Abb.18-19. Auf ihr werden Verkehrsobjektdaten, Verkehrskenngrößen und Konfigurationsdaten der Vorverarbeitungsschritte gespeichert, Abb.17. Die Datenbank dient damit als gemeinsamer Datenpool und Datenaustauschzone zwischen der Datenverarbeitung und dem GIS. Die Datenverarbeitungsalgorithmen erhalten auf diese Weise die Konfigurationsdaten, im GIS-Bereich kann auf die im Datenverarbeitungsteil erzeugten Daten zur Visualisierung und Datenanalyse zugegriffen werden, Abb.17. Das GIS kann außerdem auf Konfigurationsdaten zugreifen. Der dritte Datenspeicher enthält ein Modell des Straßenverkehrs und bildet den kartografischen Rahmen für Visualisierungsaufgaben.

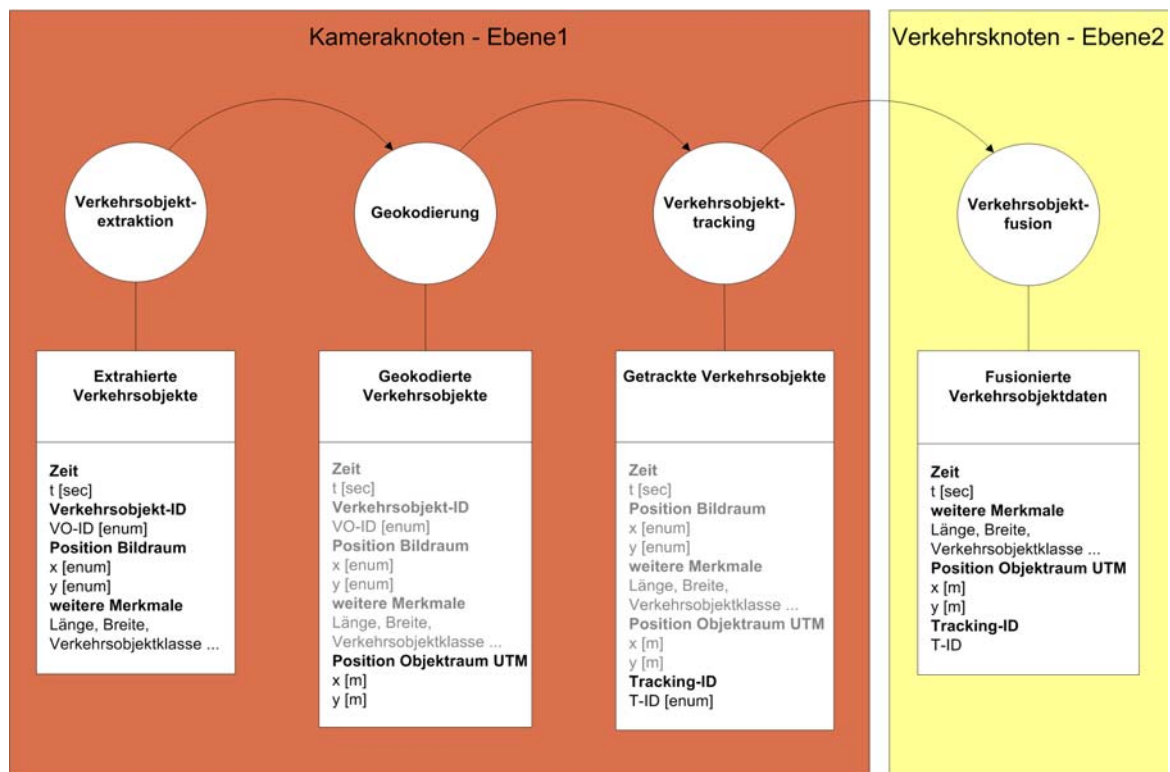


Abb. 18 Datenverarbeitung, Prozesskette und abgeleitete Daten, Verkehrsobjektdatenerzeugung

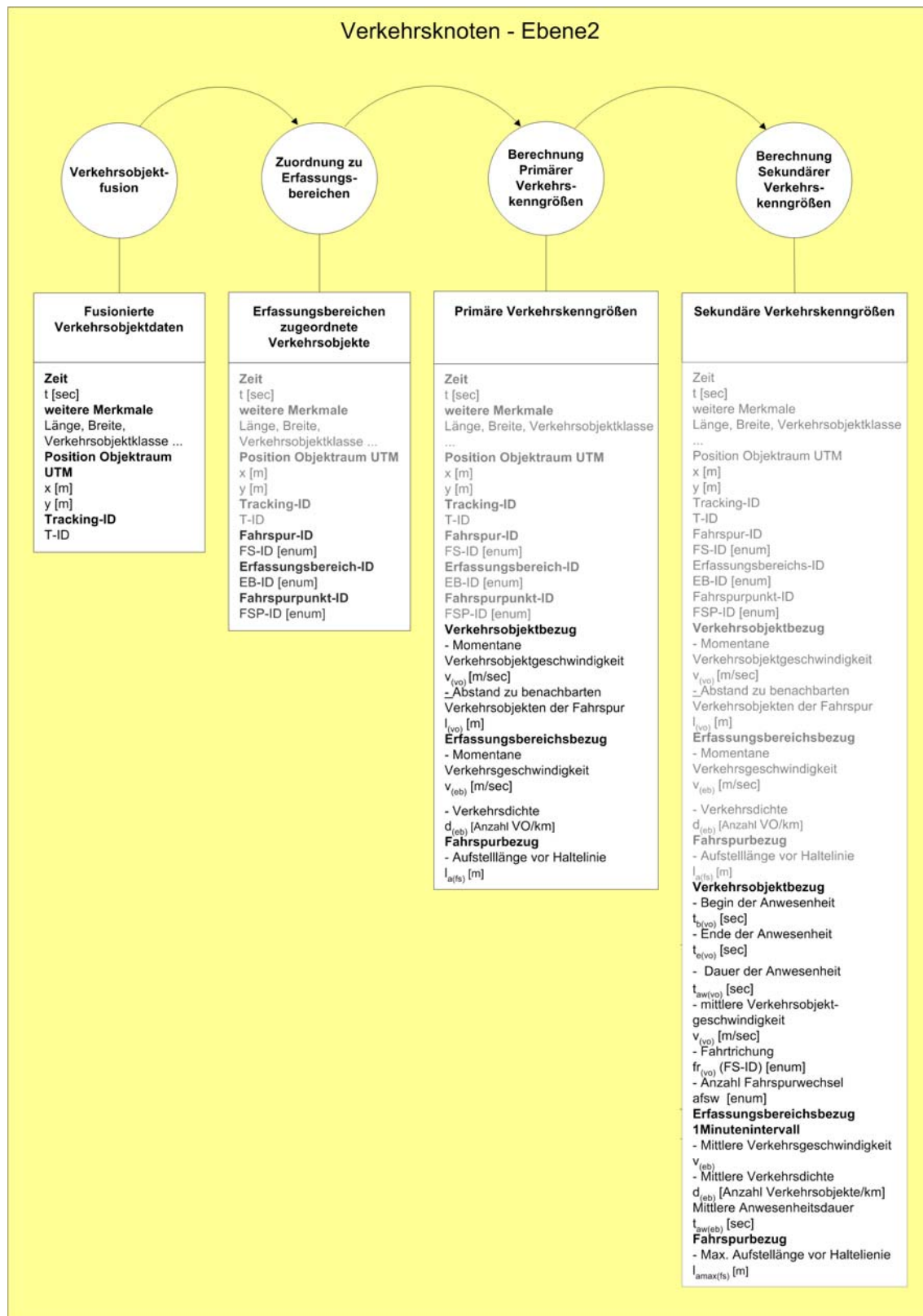


Abb. 19 Datenverarbeitung, Prozesskette und abgeleitete Daten, Verkehrskenngrößenberechnung

5.2.2 Datenbankmodell

Die Organisation der erzeugten Daten erfolgt in einem relationalen Datenbanksystem⁵⁰. Die Datenbank bildet das Kernstück zur Verwaltung der Daten. Die Strukturierung der Daten innerhalb des Datenbanksystems ist Gegenstand der folgenden Ausführungen.

Ziel der Datenbankmodellierung ist die Organisation der Daten. Sie soll sowohl den inhaltlichen Zusammenhang der Daten widerspiegeln als auch den Strukturierungsregeln des Datenbanksystems entsprechen. Zur Verwaltung der Daten wird das in Abb.20-21 dargestellte Datenbankschema verwendet. Grundlage des Datenbankschemas sind relationale Datentabellen. Die einzelnen Tabellen werden über Primär- und Fremdschlüssel miteinander verknüpft. Dadurch werden Beziehung zwischen den Tabellen und ihren Attributen erzeugt. Verknüpfte Tabellen werden entsprechend den Attributen durch Verbinder gekennzeichnet. Die Pfeilrichtung symbolisiert über- und untergeordnete Tabellen. Die Pfeilspitzen der Verbindungen zeigen in Richtung der übergeordneten Tabellen. In der Kopfzeile jeder Tabelle stehen die Attribute, die als Schlüssel verwendet werden. Die Verknüpfungen werden als Relationen bezeichnet. Anhand der Relationen können Daten verschiedener Tabellen in Zusammenhang gebracht werden. Dies ist für unterschiedlichste Aufgabenstellungen von Bedeutung, bei denen Daten gezielt extrahiert und den Algorithmen zur Datenverarbeitung oder im GIS-Teil einem Benutzer zur Verfügung gestellt werden sollen.

In Anlehnung an die o. g. Ausführungen zum Datenverarbeitungs- und Datenflussmodell können die Tabellen logischen Ebenen zugeordnet werden, aus denen die Daten erzeugt worden sind. Zwischen den Datentabellen gleicher und unterschiedlicher logischer Ebenen bestehen Relationen. Damit wird der Zugriff nachfolgender Verarbeitungsprozesse auf Daten, die durch vorangegangene Prozesse erzeugt werden, verdeutlicht. Gleichzeitig zeigen die Verknüpfungen die Verbindungen und Abhängigkeiten zwischen den Daten.

In Abb.20 ist der Verknüpfungsgrad zwischen den Tabellen sehr gering. Die Tabellen umfassen Daten, die im Rahmen von Konfigurationsaufgaben durch einen Benutzer auf Leitstellenebene erzeugt werden. Die Daten der einzelnen Tabellen werden für Prozesse benötigt, die nicht unmittelbar miteinander in Beziehung stehen. Das sind im einzelnen Tabellen mit Daten zur geometrischen Kamerakalibration, zur Konfiguration von Erfassungsbereichen mittels Regions Of Interest (ROI), sowie Tabellen mit Angaben zur Zeitauswahl für Datenverarbeitungs- und Visualisierungszwecke. Die Daten zur geometrischen Kamerakalibration werden zur Verortung bzw. Geokodierung der Verkehrsobjekte im Weltmodell verwendet, Abb.20. Sie werden für die weiteren Aufgabenstellungen im Rahmen der Datenverarbeitung nicht benötigt und stehen deshalb in keinem relationalen Zusammenhang mit den Daten anderer Tabellen. Auf der GIS-Seite werden diese Daten jedoch für Visualisierungszwecke benötigt. Außerdem werden Angaben zur Datenauswahl archivierter Verkehrsobjektdaten verwaltet, anhand derer die Verkehrskenngrößenberechnung erfolgt, Abb.20. Zur Ergebnisvisualisierung werden ebenfalls Zeiteinträge gespeichert. Zur Berechnung von Verkehrskenngrößen werden Regions of Interest herangezogen. Dazu werden klassischerweise Vierecke verwendet, mit denen Induktionsschleifen nachempfunden werden. Die Festlegung erfolgt in den Bilddaten durch einen Benutzer. Dieses Verfahren wird innerhalb des Projektes OIS angewendet. Zur Bereitstellung der erforderlichen Daten wurden entsprechend den Projektanforderungen grafische Benutzerwerkzeuge auf Leitstellenebene umgesetzt. Die Geometriedaten sowie weitere Angaben bezüglich der zu berechnenden Verkehrskenngrößen werden ebenfalls innerhalb der Datentabellen verwaltet, Abb.20.

50. MySQL

Die Methode der Zuordnung von Verkehrsobjekten zu Erfassungsbereichen anhand von Regions of Interest wird in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Deshalb bestehen auch keine Verbindungen zu anderen Tabellen.

Der Hauptanteil der Daten, Tabellen und Relationen ist in Abb.21 dargestellt. Dieser Bereich des Datenbankschemas enthält Daten und Tabellen unterschiedlicher logischer Ebenen. Die einzelnen Tabellen sind über Relationen zu einem komplexen Datennetzwerk verknüpft. Relationen bestehen sowohl zwischen den Tabellen gleicher als auch unterschiedlicher Ebenen. Die Tabellen bzw. deren Attribute der logischen Ebene 4 (Leitstelle) stellen zusammen mit denen der logischen Ebene 1 (Kameraknoten) die Primärschlüssel. Diese Primärschlüssel sind den Tabellen der logischen Ebene 2 (Verkehrsknoten) als Fremdschlüssel hinzugefügt. Die Tabellen der Ebenen 1 und 4 sind denen der Ebene 2 übergeordnet.

Die Tabellen der Leitstelle umfassen Konfigurationsdaten von Fahrspuren und Erfassungsbereichen. Zur Konfiguration von Erfassungsbereichen werden in dieser Arbeit Fahrspuren verwendet. Der Fahrspurverlauf wird geometrisch durch Punktmengen beschrieben. Die Daten, mit denen Fahrspuren charakterisiert werden, sind in den entsprechenden Tabellen abgebildet. Zur Erzeugung von Erfassungsbereichen werden die Punktmengen einer Fahrspur in einzelne Abschnitte unterteilt. Diese Unterteilung kommt in den Tabellen ebenfalls zum Ausdruck, Abb.21. Die Zugehörigkeit zwischen Fahrspuren und ihren Erfassungsbereichen wird in dem Datenbankschema durch entsprechende Relationen ausgedrückt.

Die Tabellen der logischen Ebene Kameraknoten beinhalten die Verkehrsobjektdaten. Die Verkehrskenngrößen werden in dem Datenbankschema innerhalb der logischen Ebene 2 (Verkehrsknoten) eingeordnet. Die Tabellen sind entsprechend dem Datenverarbeitung- und Datenflussmodell in zeitliche und weitere Kategorien unterteilt. Die Tabellen primärer und sekundärer Verkehrskenngrößen werden in Tabellen mit Verkehrsobjekt- Erfassungsbereichs- und Fahrspurbezug unterteilt. Diese Tabellen sind über Fremdschlüssel mit den Tabellen der logischen Ebenen 1 und 4 verknüpft, Abb.20.

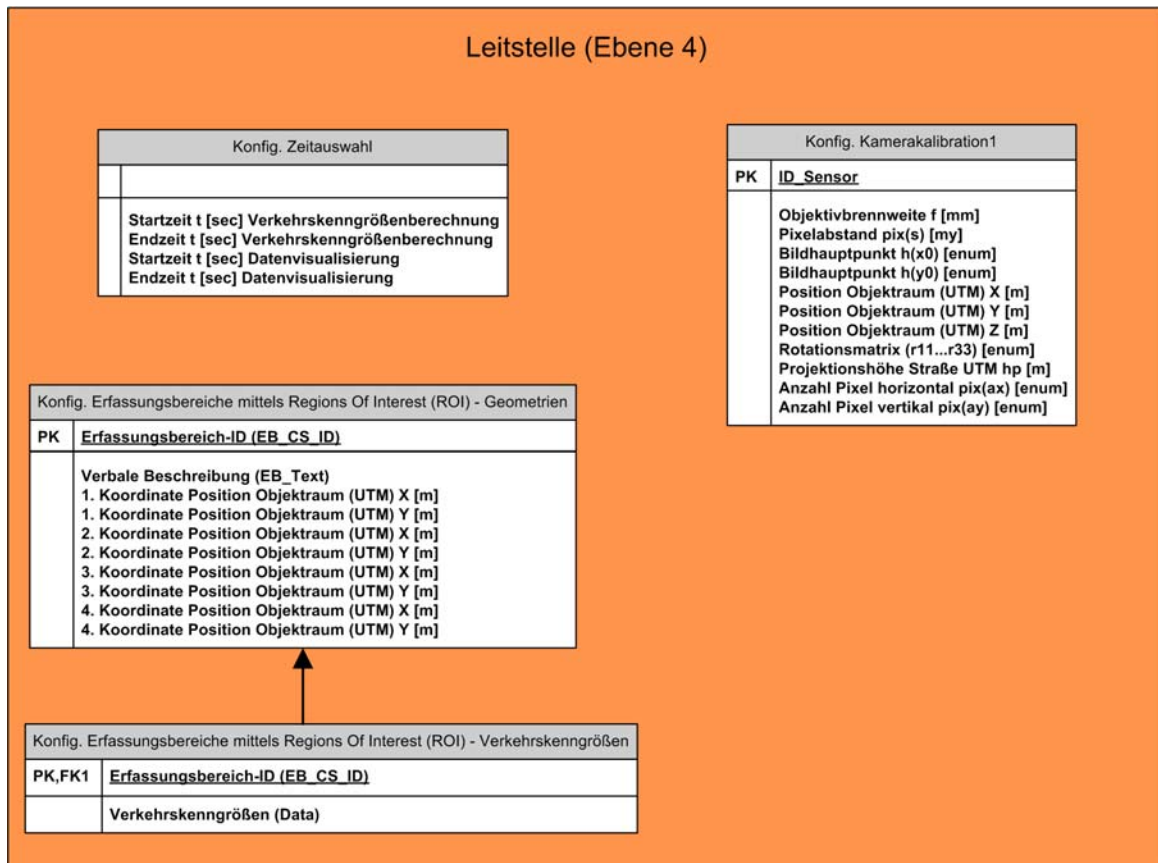


Abb. 20 Datenbankmodell, Tabellen und Relationen - PK = Primäry Key (Primärschlüssel), FK = Foreign Key (Fremdschlüssel)

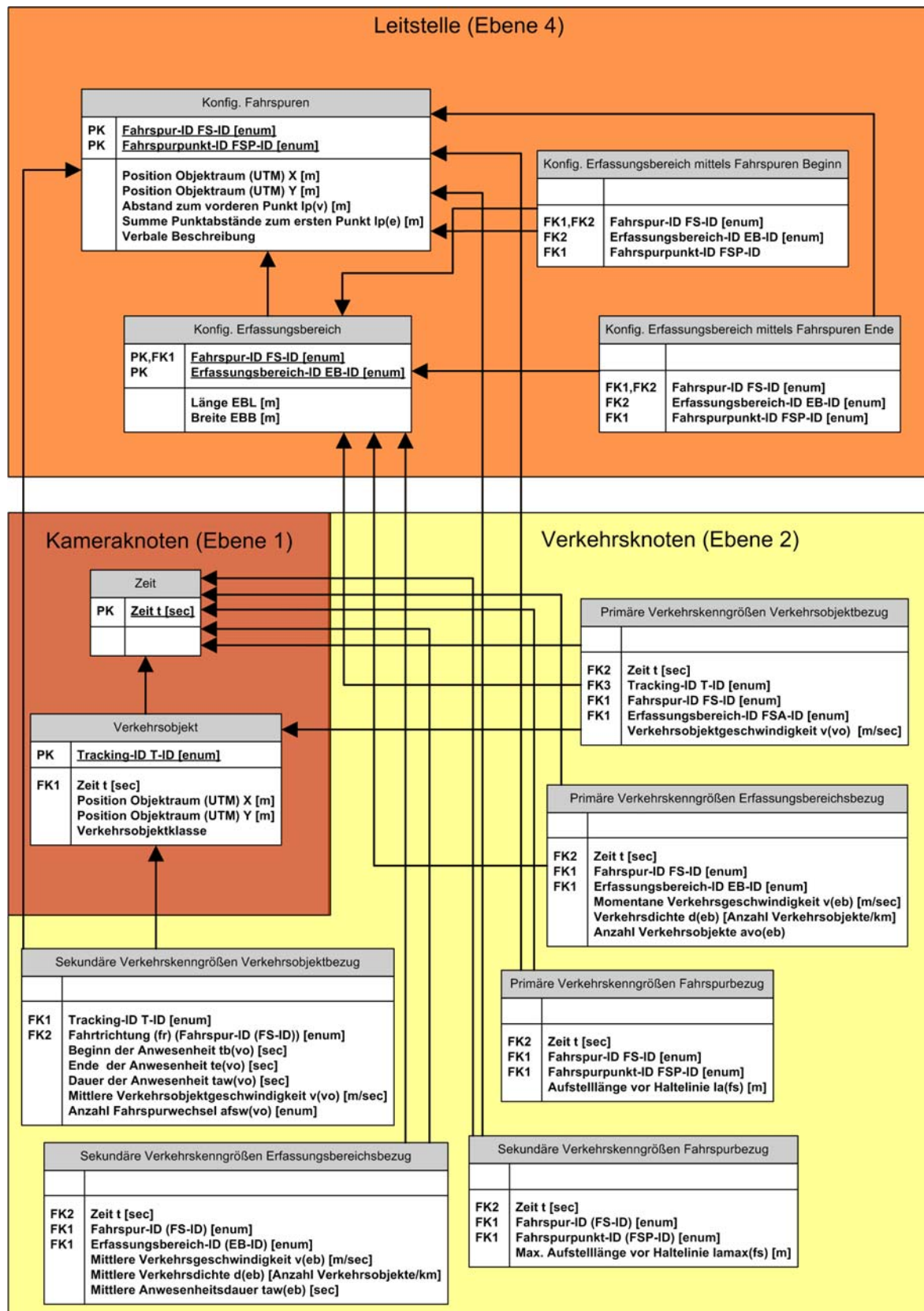


Abb. 21 Datenbankmodell, Tabellen und Relationen - PK = Primäry Key (Primärschlüssel), FK = Foreign Key (Fremdschlüssel)

5.2.3 Konfiguration

Im Vorfeld der Datenverarbeitung sind durch einen Benutzer bestimmte Konfigurationsschritte auf Leitstellenebene durchzuführen. In den folgenden Abschnitten werden die notwendigen Verarbeitungsprozesse vorgestellt. Die geometrische Kamerakalibration steht am Anfang der Vorverarbeitung, da sie bereits für weitere Schritte im Rahmen der Vorverarbeitung benötigt wird. Zur Ableitung von Verkehrskenngrößen müssen die während der Bildverarbeitung extrahierten Verkehrsobjekte in einen räumlichen Zusammenhang gebracht werden. Das erfolgt durch die Zuordnung der Verkehrsobjekte zu Erfassungsbereichen. Im Anschluss an die geometrische Kamerakalibration werden zwei Ansätze zur Festlegung von Erfassungsbereichen vorgestellt. Bei dem ersten Verfahren werden die Erfassungsbereiche mittels Regions of Interest (ROI) durch den Benutzer festgelegt. Das Verfahren wurde zur Verkehrskenngrößenberechnung innerhalb des Projektes OIS herangezogen. Zur Ableitung von Verkehrskenngrößen wurde in dieser Arbeit ein alternativer Ansatz verfolgt. Das Verfahren beinhaltet die Definition von Erfassungsbereichen auf der Basis partitionierter Fahrspuren. Die Fahrspurgeometrien werden dabei aus den Verkehrsobjekttrajektorien der Verkehrsteilnehmer ermittelt. Die Ergebnisse der Konfiguration werden für die anschließende Datenverarbeitung verwendet.

5.2.3.1 Geometrische Kamerakalibration

Die geometrische Kamerakalibration stellt den ersten Teilbereich der Georeferenzierung dar. Im Zuge des Kalibrationsprozesses wird der geometrische Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten einer Sensoraufnahme und den Objektkoordinaten eines übergeordneten geodätischen Bezugssystems⁵¹, mit dem die Erdoberfläche bzw. das Weltmodell beschrieben wird, hergestellt. Die Kenntnis des geometrischen Zusammenhangs zwischen den Koordinatensystemen wird durch spezifische Parameter ausgedrückt, die durch das jeweilige Verfahren zur Koordinatentransformation definiert werden. Die Durchführung der geometrischen Kamerakalibration ist zur Geokodierung bzw. Verortung der Verkehrsobjekte innerhalb des Weltmodells und der darauf aufbauenden Verarbeitungsschritte notwendig.

Der mathematische Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten lässt sich durch das Modell der Zentralprojektion beschreiben. Bei diesem Verfahren werden korrespondierende Bild- und Objektkoordinaten durch einen Richtungsvektor bzw. Blickstrahl beschrieben. Der Richtungsvektor verläuft durch das Projektionszentrum, Abb.22. Die Richtungsvektoren aller Punkte ergeben ein Strahlenbündel. Mathematisch wird dieser Zusammenhang durch die Kollinearitätsgleichungen beschrieben. Die Parameter der inneren- und der äußeren Orientierung sind Bestandteil dieser Gleichungen. Sie müssen während des Kalibrationsprozesses bestimmt werden.

Die innere Orientierung beschreibt mit dem Bildhauptpunkt (ξ_0, η_0) und der Brennweite bzw. Fokallänge f des Objektivs geometrische Merkmale des Sensors. Diese Parameter können den Angaben von Herstellern der Sensoren und Objektive direkt entnommen oder aus ihnen ermittelt werden. Die äußere Orientierung beschreibt durch drei Translationen (X, Y, Z) die Position und durch drei Rotationen (ϕ, ω, κ) die Lage des Sensors im Objektraum. Die Bestimmung der äußeren Orientierung erfolgt anhand monokularer Bilder über einen photogrammetrischen Rückwärtsschnitt. Die einzelnen Parameter werden dabei iterativ durch Kleinste-Quadrate-Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen berechnet.

51. ETRS89 und UTM-Projektion

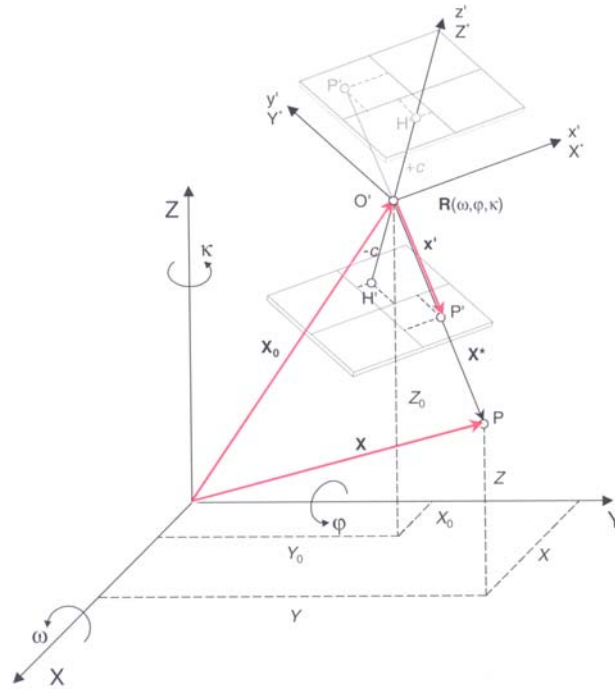


Abb. 22 Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten (Luhmann 2003)

Dazu werden die Parameter der inneren Orientierung sowie die Zuordnung zwischen den Bild- und Objektkoordinaten der Passpunkte benötigt. Aus den Lagewinkeln der äußeren Orientierung werden die Elemente der Rotationsmatrix bestimmt. Die äußere Orientierung geht über die Rotationsmatrix und über das Projektionszentrum (X_0, Y_0, Z_0) in die Kollinearitätsgleichungen ein. Der Aufbau der Rotationsmatrix ist von der Drehreihenfolge der Koordinatenachsen während des Kalibrationsprozesses abhängig. Die Reihenfolge der Drehungen wurde durch die verwendete Software zur Bestimmung der äußeren Orientierung festgelegt. Die folgende Rotationsmatrix ergibt sich aus der Drehreihenfolge (ϕ, ω, κ).

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

mit

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos(\Phi) \times \cos(\kappa) + \sin(\Phi) \times \sin(\omega) \times \sin(\kappa), \\ r_{12} &= -\cos(\Phi) \times \sin(\kappa) + \sin(\Phi) \times \sin(\omega) \times \cos(\kappa), \\ r_{13} &= \sin(\Phi) \times \cos(\omega), \\ r_{21} &= \cos(\omega) \times \sin(\kappa), \\ r_{22} &= \cos(\omega) \times \cos(\kappa), \\ r_{23} &= -\sin(\omega), \\ r_{31} &= -\sin(\Phi) \times \cos(\kappa) + \cos(\Phi) \times \sin(\omega) \times \sin(\kappa), \\ r_{32} &= \sin(\Phi) \times \sin(\kappa) + \cos(\Phi) \times \sin(\omega) \times \cos(\kappa), \\ r_{33} &= \cos(\omega) \times \cos(\Phi). \end{aligned}$$



Abb. 23 Position Ist- (Vierecke) und Sollkoordinaten (Dreiecke) der Passpunkte (Passpunkt-ID) - Sensor-ID 1, Tab.5, Sensorstandort-ID 1, Abb.11

Ergebnis der Verarbeitungsprozesse sind die Parameter der geometrischen Kamerakalibration. Die Daten werden in der entsprechenden Datenbanktabelle, Abb.20, gespeichert und stehen damit den weiteren Verarbeitungsschritten zur Verfügung.

Diskussion

Die geometrische Kamerakalibration ist für jeden Sensor im Vorfeld des automatischen Datenverarbeitungsbetriebs einmalig durchzuführen. Bei Veränderungen der Sensorposition oder -blickrichtung durch diverse Umwelteinflüsse stimmen auch die Werte der äußeren Orientierung nicht mehr. Der Kalibrationsprozess muss in diesem Fall wiederholt werden.

Die getrennte Bestimmung der äußeren Orientierung für jeden Sensorstandort führt bei der Auswertung von Daten mehrerer Sensoren zu geometrischen Spannungen. Dadurch entstehen Abweichungen zwischen den Objektkoordinaten eines Verkehrsobjekts, das von mehreren Sensoren gleichzeitig in überlappenden Abbildungsbereichen erfasst wird. Die geometrischen Spannungen beeinflussen letztendlich die Qualität des räumlich übergeordneten Verkehrsmodells an einem Verkehrsknoten, dass aus Verkehrsmodellen einzelner Sensoren zusammengesetzt wird.

Das Problem der geometrischen Spannungen bleibt prinzipiell auch dann bestehen, wenn sich die Abbildungsbereiche der Sensoren nicht überdecken, d. h. wenn sie direkt aneinander grenzen oder zwischen ihnen ein Abstand besteht. Diese Problematik ist für Verarbeitungsprozesse bedeutend, bei denen Daten der Sensoren zu einem Verkehrsmodell des Verkehrsknotens weiterverarbeitet werden. In diesem Zusammenhang ist die Datenfusion zu nennen. Mit dem Verfahren des Bündelblockausgleichs können diese Spannungen reduziert werden. Beim Bündelblockausgleich wird die äußere Orientierung für mehrere Sensorstandorte gleichzeitig ermittelt. Dadurch werden die Kalibrationsparameter und damit die Koordinatentransformation zwischen Bild- und Objektraum der einzelnen Sensoren besser aufeinander abgestimmt. Voraussetzung zur Durchführung des Bündelblockausgleichs sind jedoch Bilddaten unterschiedlicher Sensorstandorte, deren Abbildungsbereiche sich partiell überdecken. Solche Abbildungs mosaiken konnten jedoch in den Messkampagnen nur teilweise realisiert werden. Um eine einheitliche Vorgehensweise bezüglich der geometrischen Kamerakalibration zu gewährleisten, wurde deshalb auf dieses Verfahren verzichtet. Bei zukünftigen Arbeiten sollte der Bündelblockausgleich jedoch durchgeführt werden.

Die Objektiverzeichnung stellt eine weitere Größe dar, die Einfluss auf die Transformationsgenauigkeit zwischen Bild- und Objektraum hat. Über die Objektiverzeichnung kann die Abweichung des Strahlengangs einer gegebenen Optik bezogen auf eine ideale Optik charakterisiert werden. Diese Abweichungen beeinflussen die Ergebnisse der Koordinatentransformation. Sie können bei Bedarf durch Labormessungen ermittelt werden.

Die geometrische Kamerakalibration wurde für unterschiedliche Sensoren, Standorte und Blickrichtungen durchgeführt. Zur Bestimmung der inneren Orientierung wurden ausschließlich Herstellerangaben verwendet. Die äußere Orientierung wurde anhand der photogrammetrischen Software LISA [www-LISA] ermittelt. Zur Beurteilung der geometrischen Kamerakalibration wurden die Bildkoordinaten der Passpunkte über die Kollinearitätsgleichungen in Objektkoordinaten transformiert. Durch Differenzbildung wurden die Abweichungen zwischen den photogrammetrisch errechneten und den vermessenen Objektkoordinaten der Passpunkte bestimmt. Mit dieser Methode wurde die äußere Orientierung exemplarisch für zwei Sensorstandorte (Sensorstandort-ID 1,2, Abb.11) des Sensorsystems Camlink (Sensor-ID 1, Tab.5) bewertet. Die Ergebnisse der geometrischen Kamerakalibration sind in Tab.10-14 im Anhang und in Abb.23 dokumentiert. Die durchschnittliche Koordinatenabweichung beträgt für den ersten Standort im Objektraum in X-Richtung 0.2m und in Y-Richtung 0.4m. Beim zweiten Sensorstandort sind die mittleren Koordinatenabweichungen mit 1.3m in X-Richtung und 1m in Y-Richtung deutlich größer, Tab.14 im Anhang. Die Gründe sind einerseits in der Genauigkeit der Passpunkte zu suchen. Die Passpunkte des ersten Sensorstandorts befinden sich in der Umgebung eines Gebäudes, dass die Qualität der DGPS-Messung beeinflusst. Aufgrund der stark variierenden geometrischen Auflösung in den Bilddaten nimmt die Genauigkeit der Koordinatentransformation mit zunehmender Entfernung zwischen Sensor und Objekt ab. Die durchschnittliche Entfernungen zwischen Passpunkten und Sensor ist beim zweiten Standort mit 80m wesentlich größer als beim ersten Standort (50m), Tab.12-13 im Anhang. Zur Repräsentation der Verkehrsobjektposition wird eine Koordinate aus dem im Zuge der Bildverarbeitung segmentierten Verkehrsobjekt verwendet. Die zur Positionsbestimmung verwendete Stelle am Verkehrsobjekt, z. B. Dach, Front, Heck, ist durch die Bildverarbeitung nicht exakt vorhersagbar und variiert deshalb. Außerdem kommt es durch die Projektion der Verkehrsobjektposition in eine Ebene (Abb.31) zu weiteren Fehlern. Aus den genannten Gründen gilt die ermittelte Verkehrsobjektposition als Näherungswert. Angesichts einer durchschnittlichen PKW-Größe von ca. 4m und den deutlich geringeren mittleren Koordinatenabweichungen von 0.2-1m (Tab.14 im Anhang) wird die geometrische Kamerakalibration als hinreichend genau betrachtet.

5.2.3.2 Konfiguration von Erfassungsbereichen mittels Regions of Interest

Die Detektion von Verkehrsobjekten und deren Zuordnung zu Erfassungsbereichen erfolgt bei herkömmlichen opto-elektronischen Messsystemen innerhalb von Regions of Interest. Im Rahmen von OIS bestand die Aufgabenstellung, ein geeignetes grafisches Benutzerwerkzeug zur Erstellung und Verwaltung von Erfassungsbereichen auf der Basis von Regions of Interest zu konzipieren und zu implementieren. Die Funktionalität eines solchen Konfigurationswerkzeugs ist dementsprechend das Ergebnis der speziellen Anforderungen, die durch das Projekt OIS zur Festlegung konventioneller Erfassungsbereiche vorgegeben wurden. Dieses Werkzeug wurde zwar nicht zur Berechnung der in dieser Arbeit vorgestellten Verkehrskenngrößen verwendet. Die Funktionalität des Moduls soll an dieser Stelle trotzdem kurz vorgestellt werden, um die Unterschiede zu dem im Anschluss beschriebenen Verfahren, der Konfiguration von Erfassungsbereichen mittels Fahrspuren zu verdeutlichen.

Der GIS-spezifische Charakter dieser grafischen Benutzerschnittstelle wird in Abb.24 deutlich. Eine gekodierte Karte⁵² und Bilddaten der Sensoren bilden den kartografischen Rahmen zur Festlegung von Regions of Interest. Der Benutzer kann ein Bild eines beliebigen Sensorstandorts auswählen. Anschließend wird automatisch die digitale Karte geladen. Die Kartendarstellung erfolgt einerseits separat und andererseits als Projektion innerhalb des Videobildes. Dazu werden die Koordinaten der Kartenelemente anhand der Kollinearitätsgleichungen vom Objekt- in den Bildraum transformiert. Das setzt die Kenntnis der geometrischen Kamerakalibration des jeweiligen Sensors voraus. Die Kalibrationsdaten müssen im Vorfeld durch den Benutzer aus der Datenbank ausgewählt werden. Die Kenntnis der geometrischen Kamerakalibration ermöglicht eine räumlich-zeitlich simultane Darstellung sämtlicher Benutzeraktionen innerhalb der Bilddaten und der digitalen Karte. Aus der Kartenübersicht können durch den Benutzer Ausschnitte erstellt werden (Abb.24 Links oben und unten). In diesen Kartenausschnitten erfolgt die geometrische Festlegung der Erfassungsbereiche. Regions of Interest werden geometrisch durch Polygone repräsentiert. Die Anzeige von Koordinaten- und Entfernungen ermöglicht eine sehr präzise Festlegung der Polygoneometrie, d. h. der Länge, Breite und Position. Damit keine unerwünschten Lücken zwischen den Erfassungsbereichen entstehen, können sie beim Zeichnen über eine Snapfunktion exakt aneinandergefügt werden. Erfassungsbereiche können bei Bedarf wieder entfernt werden. Die topologische Festlegung der Erfassungsbereiche erfolgt anhand von Identifikationsschlüsseln, Abb.24 Rechts unten. Außerdem können für jeden Erfassungsbereich die im Datenverarbeitungsbetrieb zu berechnenden Verkehrskenngrößen ausgewählt werden. Die Konfiguration der Erfassungsbereiche, d. h. die Geometrie- und Topologiedaten, kann in Tabellen der Datenbank gespeichert und bei Bedarf erneut geladen werden.

Diskussion

Das vorgestellte Modul ermöglicht eine flexible Konfiguration und sehr exakte Ausrichtung von Erfassungsbereichen auf der Basis von Regions of Interest. Die geokodierte Karte zeichnet sich durch eine sehr detaillierte Darstellung und ein hohes räumliches Auflösungsvermögen des Straßenraums aus. Die simultane Anzeige von Benutzeraktionen in der geokodierten Karte und den Bilddaten stellt eine Verschmelzung von GIS-Funktionen mit denen herkömmlicher opto-elektronischer Messsysteme zur Festlegung von Erfassungsbereichen dar.

52. CAD-Modell

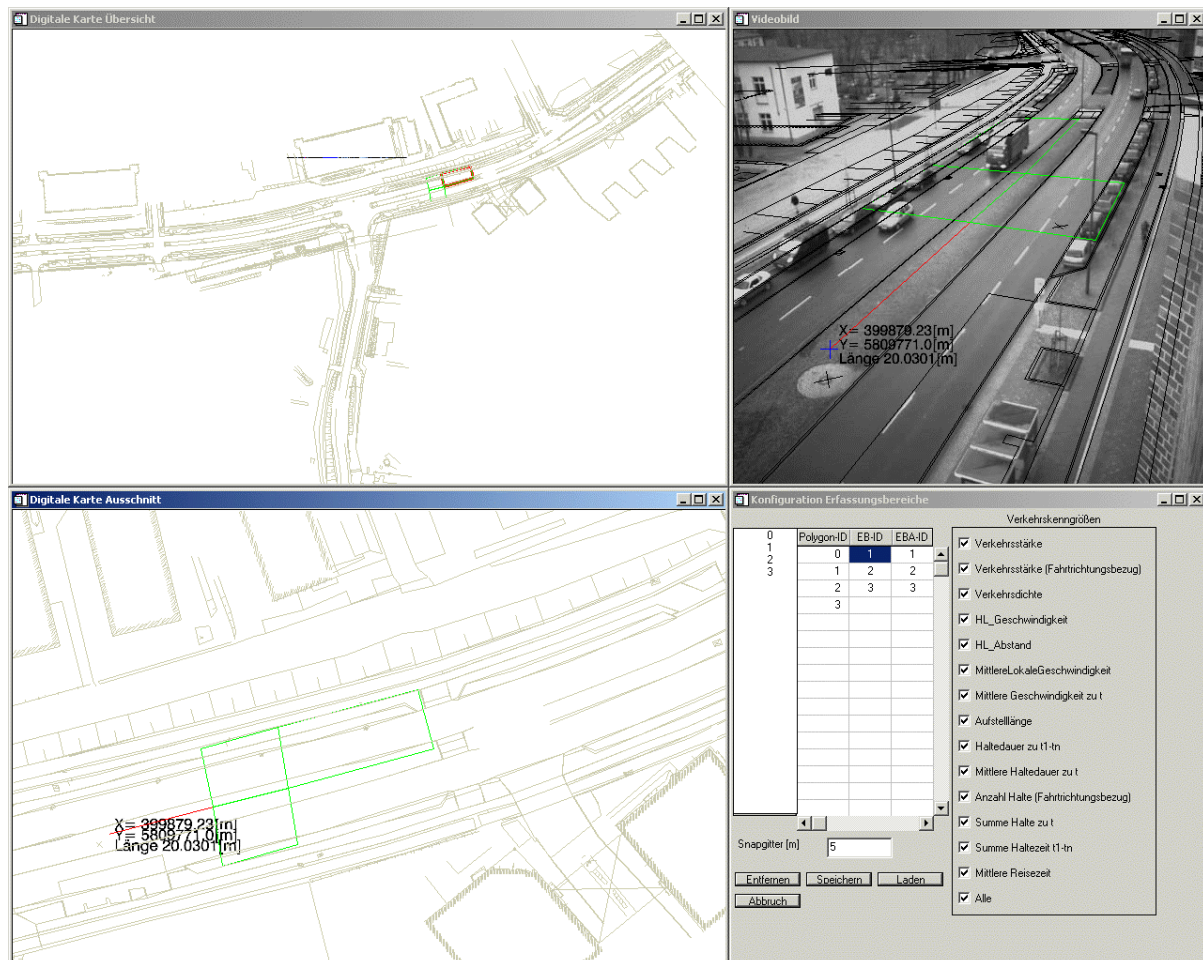


Abb. 24 GIS-Modul zur Konfiguration von Erfassungsbereichen mittels Regions of Interest - Links oben und unten: Übersicht und Ausschnitt der geokodierten Karte des Testgebietes, Rechts oben: Projektion von Karte und Erfassungsbereichen innerhalb des Videobildes, Rechts unten: Festlegung der Topologie von Erfassungsbereichen und der zu berechnenden Verkehrskenngrößen

Bei herkömmlichen kommerziellen opto-elektronischen Messsystemen erfolgt die Festlegung von Erfassungsbereichen ausschließlich anhand von Bilddaten. Aufgrund der Schrägaufnahmen verändern sich aber die Abbildungsmaßstäbe im Bildraum erheblich. Das erschwert die Erstellung und Positionierung der Erfassungsbereiche. Da mit herkömmlichen Messsystemen im allgemeinen querschnittsbezogene Verkehrskenngrößen abgeleitet und dazu kleine Erfassungsbereiche benötigt werden, ist diese Vorgehensweise durchaus angemessen. Im Zusammenhang mit der Ableitung streckenbezogener Verkehrskenngrößen sind jedoch große Erfassungsbereiche erforderlich. Schrägaufnahmen des Straßenraums sind für derartige Konfigurationsaufgaben nicht praktikabel. Aufnahmen schräg zur Straße führen außerdem dazu, dass Verkehrsobjekte über ihre Fahrspur hinaus weitere Bereiche des Straßenraums verdecken. Die Verdeckungen sind von der Position und dem vertikalen Blickwinkel des Sensors zur Straße sowie der Verkehrsobjekthöhe abhängig.

Die Verwendung von Daten, mit denen der Straßenverkehrsraum aus einer senkrechten Perspektive abgebildet wird, ist deshalb sinnvoll. Das ermöglicht eine sehr präzise Definition der Geometrie und Positionierung der Erfassungsbereiche. Aus diesem Grund erfolgen die Benutzereingaben innerhalb der digitalen Kartenausschnitte.

Die ausschließliche Festlegung der Erfassungsbereiche über eine digitale Karte könnte die Zuordnung von Verkehrsobjekten zu Erfassungsbereichen beeinträchtigen. Die synchrone Anzeige von Benutzereingaben in den Bilddaten ermöglicht eine Abschätzung der Verkehrsobjektverdeckungen und deren Berücksichtigung bei der Festlegung von Erfassungsbereichen. Deshalb ist die Auswahl einer Bildszene mit Verkehrsobjekten sinnvoll. In diesem Zusammenhang wäre auch ein Wechsel von Bildszenen oder Bildsequenzen während des Konfigurationsprozesses für einen zukünftigen Ausbau des Funktionsumfangs vorstellbar.

Das verwendete Kartenmaterial wurde in aufwendigen Vermessungsarbeiten im Vorfeld von Straßenbaumaßnahmen erhoben und bildet lediglich einen kleinen Ausschnitt des Berliner Verkehrsnetzes ab. Die flächendeckende Verfügbarkeit solcher Daten ist deshalb nicht gegeben. Zukünftig sollte auf eine hohe Verkehrsnetzabdeckung bei gleichzeitig hoher räumlicher Auflösung des Kartenmaterials geachtet werden. Diese Anforderung ist in der Realität jedoch nur schwer erfüllbar. Zur Bereitstellung von Daten des Verkehrsraums aus einer senkrechten Perspektive bietet sich als Alternative die orthogonale Transformation von Bilddaten in eine Projektionsebene an. Voraussetzung ist allerdings die Kenntnis der geometrischen Kamerakalibration. Bei diesem Verfahren werden nur Objekte korrekt dargestellt, die sich innerhalb der Ebene befinden. Als Projektionsebene sollte deshalb die Straße verwendet werden.

Ein zweiter Punkt betrifft die Datenmenge. Das verwendete CAD-Modell besteht aus etwa 20000 geometrischen Elementen. Die Verarbeitung und Darstellung dieser Datenmenge mit der verwendeten Programmiersprache IDL nimmt relativ viel Zeit in Anspruch. Ein gesamtstädtisches Modell des Straßenverkehrsraums, das ebenso detailliert wie der Beispieldatensatz ist, würde ein noch erheblich größeres Datenvolumen bedeuten. Für Visualisierungszwecke wäre eine Verringerung der Datenmenge in Abhängigkeit des Darstellungsmaßstabs, unabhängig von der Implementierungsumgebung, unerlässlich.

5.2.3.3 Konfiguration von Verkehrsdatenerfassungsbereichen mittels Fahrspuren

Die Konfiguration von Erfassungsbereichen auf der Basis von Fahrspuren stellt eine Alternative zur herkömmlichen Vorgehensweise mittels Regions of Interest dar. Das Verfahren bildet die Grundlage zur Berechnung der im weiteren Verlauf vorgestellten Verkehrskenngrößen. Die Festlegung der Erfassungsbereiche beruht auf Geometriedaten von Fahrspuren. Diese Daten können auf unterschiedlichen Wegen bereitgestellt werden. Anhand von Kartenmaterial oder Bilddaten der Sensoren können Fahrspuren z. B. manuell durch Digitalisierung erstellt werden. Eine andere Möglichkeit besteht in der Verwendung von GPS-Messdaten eines Fahrzeugs, das sich im Straßenraum bewegt. Mit dem nachfolgenden Verfahren wird ein Ansatz zur automatischen Erkennung von Fahrspuren anhand von Verkehrsobjekttrajektorien beschrieben. Darauf aufbauend erfolgt anschließend die Aufteilung von Fahrspuren in Erfassungsbereiche.

Zur automatischen Bestimmung von Fahrspuren werden die Trajektorien einzelner Verkehrsobjekte miteinander verglichen und ähnliche Trajektorien in Klassen zusammengefasst. Im Anschluss wird aus den Trajektorien für jede Klasse eine repräsentative Fahrspur bestimmt. Abschließend werden die Erhebungsbereiche zur Berechnung der Verkehrskenngrößen durch Partitionierung von Fahrspuren festgelegt.

Begriffsbestimmung und geometrische Repräsentation

Zunächst soll eine kurze Begriffsbestimmung den Unterschied zwischen Fahrspuren und Verkehrsobjekttrajektorien verdeutlichen. Fahrspuren sind normalerweise räumlich gegeneinander abgegrenzte Anlagen, auf denen sich Verkehrsteilnehmer mit der gleichen Richtung im Straßenraum bewegen. An Verkehrsknoten kommt es allerdings zu einer räumlichen Überlagerung von Fahrspuren. Die Interessen bezüglich der Fahrtrichtung sind an einem Verkehrsknoten sehr unterschiedlich. Deshalb besteht an einem Knotenpunkt trotz Lichtsignalanlagen und Vorfahrtsregeln ein erhöhtes Konfliktpotenzial. Die individuellen Fahrwege einzelner Verkehrsobjekte im zeitlichen Verlauf werden als Trajektorien bezeichnet. Die tatsächlich benutzen Fahrwege können aufgrund des subjektiven Fahrverhaltens und anderer Einflüsse⁵³ durchaus von den vorgegebenen Fahrspuren abweichen. Fahrspuren können jedoch als statistische Größe der Fahrwege von Verkehrsteilnehmern mit gleicher Bewegungsrichtung betrachtet werden. Fahrspuren müssten demnach aus den individuellen Fahrwegen der Verkehrsteilnehmer ermittelbar sein.

Zur Bestimmung der Fahrspuren werden die Fahrwege, d. h. die Trajektorien der Verkehrsobjekte, verwendet. Voraussetzung ist die Verfolgung von Verkehrsobjekten im zeitlichen Verlauf ihrer Anwesenheit im Abbildungsbereich eines Sensors durch das Verkehrsobjekttracking.

Im Ergebnis der Verkehrsobjektfusion sind zwar die Trajektorien der Verkehrsobjekte im Vergleich zu Trajektorien eines einzelnen Sensorstandortes länger. Die Verkehrsobjektfusion ist jedoch nicht Voraussetzung zur Bestimmung der Fahrspuren, d. h. die Trajektorien nicht fusionierter Verkehrsobjekte sind für die weiteren Verarbeitungsschritte ausreichend. Dadurch wird eine einheitliche Vorgehensweise zur Fahrspurenermittlung gewährleistet.

Verkehrsobjekttrajektorien T und Fahrspuren F werden als Mengen von Objektkoordinaten definiert:

Verkehrsobjekttrajektorien T ,

$$T = \{P_i | i = 1, \dots, n\} \quad ,$$

mit

n = Anzahl Punkte P_i einer Verkehrsobjekttrajektorie T ,

Fahrspuren F ,

$$F = \{P_i | i = 1, \dots, k\} \quad ,$$

mit

k = Anzahl Punkte P_i einer Fahrspur F ,

Durch Interpolation zwischen den Punkten P_i der Trajektorien wird gewährleistet, dass

$$|P_i - P_{i+1}| = \text{const}, i=1, \dots, n-1$$

gilt.

Diese Bedingung wird zur Vereinfachung der Fahrspurbestimmung benutzt.

53. z. B. Hindernisse auf der Fahrbahn oder Baumaßnahmen

Die diskreten Punkte P_i der Mengen T und F werden durch 3D-Koordinaten im Objektraum, bzw. im Weltmodell repräsentiert. Die Z-Koordinate wird allerdings bei den weiteren Verarbeitungsschritten nicht betrachtet. Aus diesem Grund gilt

$$P_i = (X_i, Y_i)$$

Die weiteren Verarbeitungsschritte erfolgen damit im metrischen System.

Die Information, zu welchem Zeitpunkt das Verkehrsobjekt den Punkt P_i passiert, spielt dabei keine Rolle. Die Punkte P_i werden als Trajektorien- und Fahrspurpunkte bezeichnet und markieren deren Verlauf.

Klassifikation von Verkehrsobjekttrajektorien

Das Ziel der Klassifikation besteht in der Einteilung von Verkehrsobjekttrajektorien bezüglich ihrer Position und ihres Verlaufs. Trajektorien, die in diesen Merkmalen ähnlich sind, werden in einer Klasse zusammengefasst. Anhand der Trajektorien einer Klasse soll anschließend der mittlere Verlauf einer Fahrspur ermittelt werden.

Zur Klassifikation werden die Punktkoordinaten P_i^A aller Verkehrsobjekttrajektorien T^A herangezogen. Im Vorfeld der Klassifikation sind bestimmte Schritte notwendig. Zunächst müssen Trajektorien, die an dem Klassifikationsverfahren teilnehmen sollen, aus dem Datenbestand ausgewählt werden. Als Kriterium wird die Länge L_T der Trajektorien verwendet. Es werden nur solche Trajektorien zugelassen, die einen bestimmten Schwellwert S_L überschreiten. Die Konstruktion eines Merkmalsraums ist Voraussetzung zur Klassifikation der Trajektorien.

Zur Vereinfachung des Abstandsmaßes wurden bereits äquidistante Punktabstände der Trajektorienpunkte P_i aller teilnehmenden Trajektorien vorausgesetzt. Dazu erfolgt im Vorfeld der Klassifikation eine Interpolation von Punkten und die Einführung eines zusätzlichen Attributes für jeden Punkt. Anhand der Attribute können die Punkte zwei verschiedene Zustände annehmen. Je nach Zustand handelt es sich um einen realen oder einen virtuell hinzugefügten Punkt. Letztere dienen dazu, den Merkmalsraum aus einer konstanten Anzahl an Punkten für jede Trajektorie aufzubauen. Im Zuge der Konstruktion des Merkmalsraums wird das Abstandsmaß L^{AB} eingeführt. Diese Größe beschreibt den mittleren Abstand zwischen zwei Trajektorien A und B .

Die Klassifikation basiert auf der Zusammenfassung von Trajektorien durch Clusterbildung. Als Ausgangspunkt wird jede Trajektorie als Cluster definiert. Alle Trajektorien werden unter bestimmten Randbedingungen paarweise miteinander verglichen und der mittlere Trajektorienabstand ermittelt. Bei Unterschreiten eines durch den Benutzer festgelegten Abstandsschwellwertes werden die Trajektorienpaare einander zugeordnet d. h. in einem Cluster zusammengefasst.

Im Vorfeld der Klassifikation sind einige Randbedingungen durch einen Benutzer festzulegen. Zunächst wird bestimmt, welche Trajektorien an der Klassifikation teilnehmen. Mit einem Schwellwert wird die minimale Anzahl an Punkten festgelegt, die eine Trajektorie aufweisen muss, um an der Klassifikation teilzunehmen. Dadurch wird die Anzahl der zu klassifizieren Trajektorien eingeschränkt. Als 2. Randbedingung wird ein Punktabstand zur Punktverdichtung festgelegt. Abschließend wird eine Abstandsschwelle S_L definiert, bei deren Unterschreitung die Zuordnung von Trajektorienpaaren erfolgt.

Unter Beachtung dieser Randbedingung werden im ersten Schritt Trajektorienpaare gebildet, welche aus paarweise verschiedenen Trajektorien bestehen. Desweiteren kann unter Benutzung der Symmetrie des Abstandsmaßes die Anzahl der Trajektorienpaare halbiert werden. Anschließend werden die Punktabstände beider Trajektorien äquidistant verdichtet.

Zur Bestimmung des Abstandsmaßes eines Trajektorienpaares wird eine Referenz- T_R und eine Vergleichstrajektorie T_V festgelegt. Die kürzere der beiden Trajektorien wird dabei als Referenztrajektorie definiert, Abb.25. Als Längenmaß gilt die Punktzahl der Trajektorien.

Anschließend wird die euklidischen Distanz L_{ij}^{AB} zwischen zwei Punkten P_i^A und P_j^B der Trajektorienpaare im Objektraum ermittelt, Abb.25.

$$L_{ij}^{AB} = \sqrt{(X_i^A - X_j^B)^2 + (Y_i^A - Y_j^B)^2}$$

Anschließend werden korrespondierende Punktpaare festgelegt, Abb.25. Dazu wird der Minimalabstand L_i^{AB} aus allen Abständen L_{ij}^{AB} ermittelt.

$$L_i^{AB} = \min(L_{ij}^{AB})$$

mit

j = Punktindex der Vergleichstrajektorie T_V

Auf diese Weise wird für alle Punkte P_i der Referenztrajektorie T_R ein korrespondierender Punkt P_j der Vergleichstrajektorie T_V gesucht und deren Abstand L_i^{AB} bestimmt, Abb.25.

Ein Punkt der Vergleichstrajektorie kann dabei mehreren Punkten der Referenztrajektorie zugeordnet werden, Abb.25.

Anhand der Abstände zugeordneter Punktpaare wird anschließend der mittlere Trajektorienabstand L^{AB} bestimmt.

$$L^{AB} = \frac{\sum_{i=1}^K L_i^{AB}}{K}$$

mit

i = Punktindex der Referenztrajektorie T_R

und

K = Anzahl Punkte P_i der Referenztrajektorie T_R .

Trajektorienpaare werden als Cluster zusammengefasst, wenn der mittlere Trajektorienabstand L^{AB} den Abstandsschwellwert S_L unterschreitet.

Ergebnis der Klassifikation sind in Klassen eingeteilte Verkehrsobjekttrajektorien. Die diskreten Punktmengen der Verkehrsobjekttrajektorien sind gegenüber den Eingangsdaten äquidistant verdichtet.

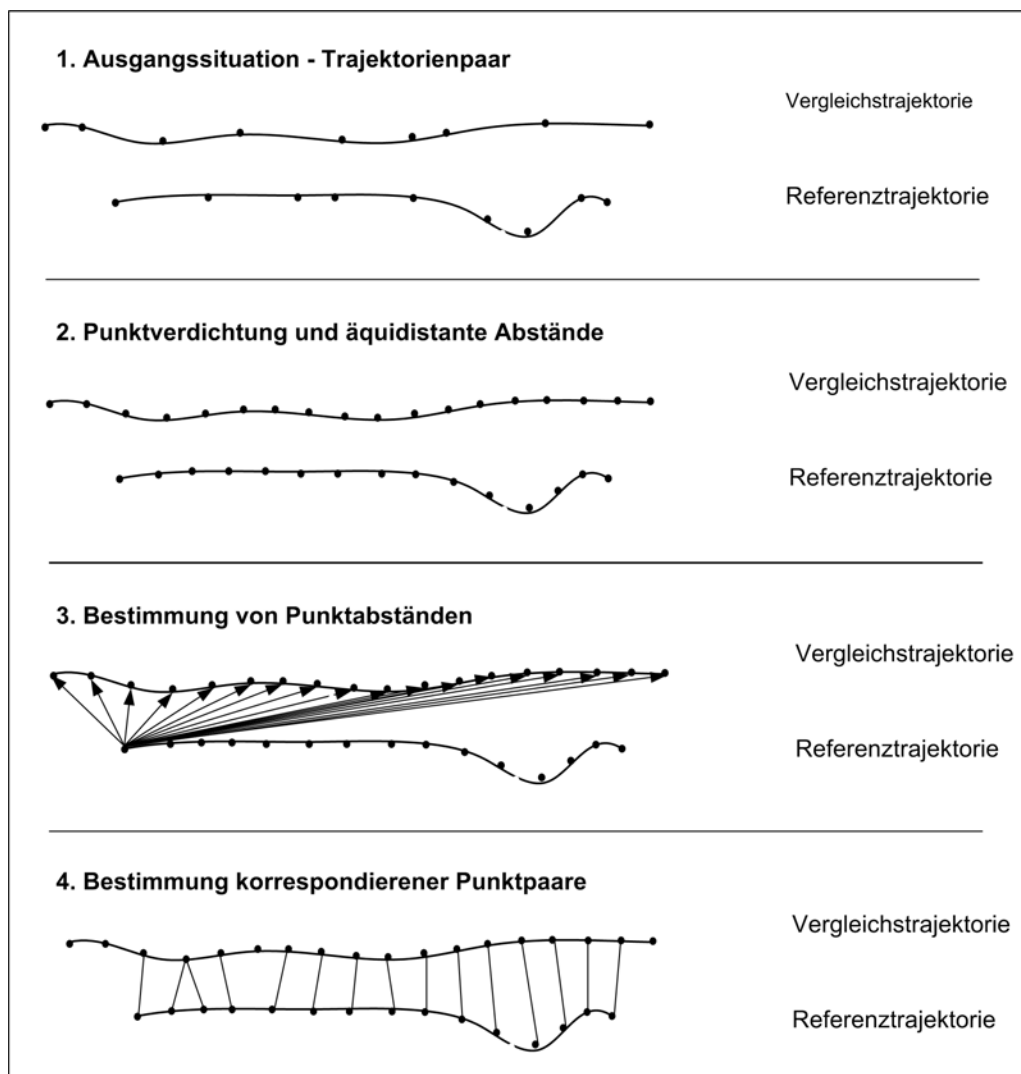


Abb. 25 Klassifikation von Verkehrsobjekttrajektorien

Diskussion

Das Klassifikationsverfahren wurde an manuell erzeugten, simulierten und von Bildverarbeitungsalgorithmen extrahierten Daten erfolgreich getestet, Abb.26. Der Nachteil des Verfahrens liegt in der intuitiven Festlegung von Randbedingungen, die eine iterative Vorgehensweise zur Klassifikation erfordern. Das betrifft einerseits die Festlegung des Abstands, den die Punkte einer Trajektorie nach der Punktverdichtung besitzen. Die Ortsauflösung der Sensordaten, die Anforderungen zur Festlegung von Erfassungsbereichen, die Trajektorienanzahl und die notwendige Rechenzeit zur Klassifikation sind in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen. Für die Punktverdichtung von Trajektorien können 0.5-2m als Orientierungswerte angenommen werden. Die Festlegung von Schwellwerten zur Auswahl der Trajektorien und zur Clusterbildung erfolgt ebenfalls intuitiv. Die Auswahl der teilnehmenden Trajektorien erfolgt anhand der Trajektorienlänge. Der dazu verwendete Schwellwert sollte so gewählt werden, dass kurze Trajektorien (ca. <5m) von der Klassifikation ausgeschlossen werden.

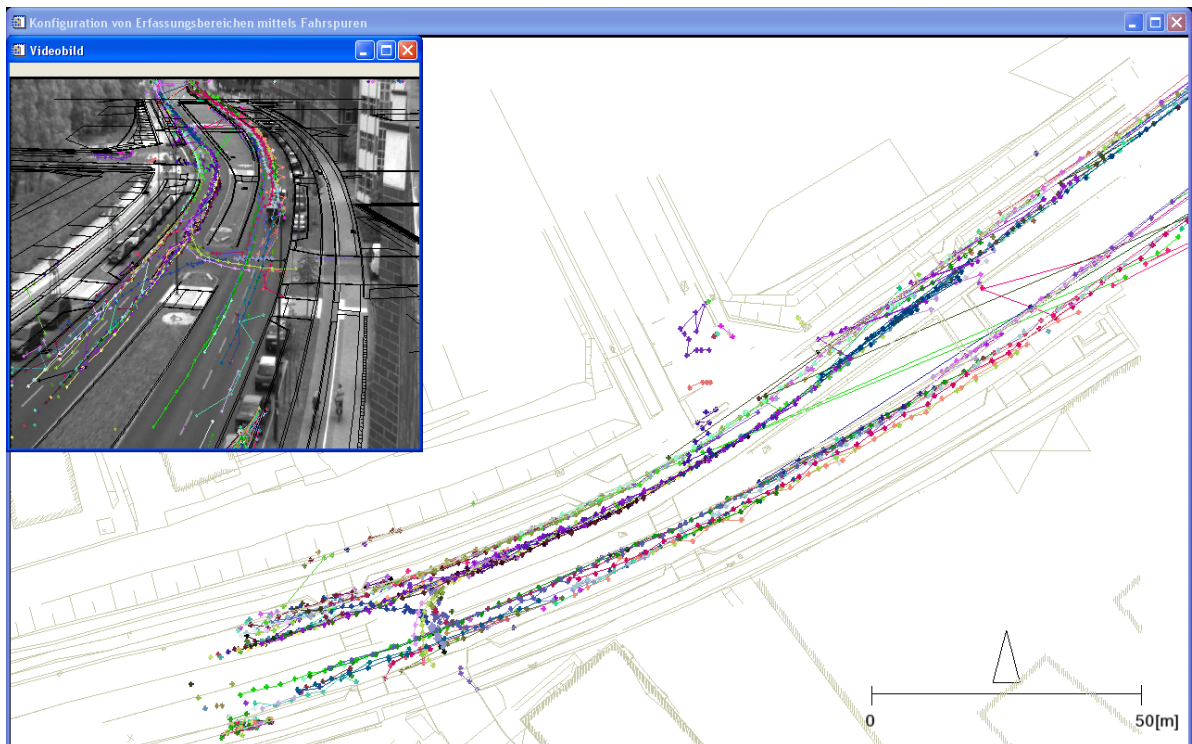


Abb. 26 Klassifikation von Verkehrsobjekttrajektorien, Reale Daten - Oben: Eingangsdaten, Unterschiedliche Farben repräsentieren einzelne Verkehrsobjekttrajektorien, Unten: Klassifikationsergebnis, Farben repräsentieren unterschiedliche Klassen

Trajektorien unterschiedlicher Fahrtrichtungen können nur korrekt separiert werden, wenn der Schwellwert zur Clusterbildung in Übereinstimmung mit den Abständen der Trajektorien gebracht werden. Bei zu großen Schwellwerten erfolgt die Einordnung von Trajektorien unterschiedlicher Fahrtrichtungen in der gleichen Klasse. Zu kleine Schwellwerte verursachen mehrere Klassen gleicher Fahrtrichtung. Unter Umständen muss dieser Wert iterativ in mehreren Klassifikationsdurchläufen ermittelt werden. Bei den getesteten Daten hat sich zur Clusterbildung ein mittlerer Trajektorienabstand von 1-1.5m bewährt. Die nachgewiesene Robustheit des Verfahrens gegenüber variierenden Trajektorienlängen und -verläufen ist ein Indiz für die korrekte Verifikation.

Bestimmung der Fahrspur

Anhand der klassifizierten Trajektorien können Fahrspuren bestimmt werden. Eine Fahrspur repräsentiert die mittleren Fahrwege der Verkehrsobjekte, die sich auf der gleichen Fahrbahn bewegen. Anhand der Fahrspuren werden anschließend die Erhebungsbereiche zur Berechnung der Verkehrskenngrößen festgelegt.

Die Ermittlung von Fahrspuren erfolgt anhand der klassifizierten Verkehrsobjekttrajektorien. Die Punkte aller Trajektorien einer Klasse beschreiben statistisch den Verlauf der Fahrspur. Die Extraktion der Fahrspur aus den Trajektorienpunkten erfordert eine Punktreduktion. Zur Repräsentation der Fahrspuren sind verschiedene Vorgehensweisen möglich.

Der Fahrspurverlauf kann z. B. durch Auswahl einer beliebigen Trajektorie als Vertreter einer Klasse repräsentiert werden. Anhand von Bildverarbeitungsalgorithmen erzeugte Verkehrsobjekte werden unter Umständen nicht während ihrer gesamten Anwesenheitszeit im Abbildungsbereich des Sensors erfasst. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Trajektorien einer Klasse unterschiedlich lang sind. Obwohl nur Trajektorien mit einer definierbaren Mindestlänge an der Klassifikation teilnehmen, sollte aus diesem Grund das Auswahlverfahren weiter spezifiziert werden. Um eine möglichst weiträumige Erfassung von Fahrspuren innerhalb des Abbildungsbereichs eines Sensors zu erreichen, wird die längste Trajektorie als Vertreter einer Klasse damit gleichzeitig als Repräsentant einer Fahrspur verwendet.

Eine weitere Möglichkeit zur Festlegung besteht in der Bestimmung einer mittleren Fahrspur aus allen Trajektorien einer Klasse. Dazu wird zunächst aus allen Trajektorienpunkten einer Klasse ein Startpunkt ermittelt. Als Startpunkt gilt der Punkt, bei dem die meisten Trajektorienpunkte in einem frei definierbaren Umkreis liegen. Anschließend wird aus den Koordinaten der Trajektorienpunkte einer Klasse, die sich im Einzugsbereich des Startpunktes befinden, der Mittelwert bestimmt. Damit ist der erste Fahrspurpunkt festgelegt. Außerdem wird die mittlere Trajektorienrichtung im Einzugsbereich des Startpunktes bestimmt. Im Anschluss wird der Richtungsvektor durch den ersten Fahrspurpunkt gelegt und die Schnittpunkte zwischen dem Vektor und einem Kreis mit frei definierbarem Umkreis um den Fahrspurpunkt bestimmt. Die Schnittpunkte bilden die nächsten Punkte der mittleren Fahrspur.

Im Umkreis dieser Punkte wird erneut ein Richtungsvektor bestimmt und die Schnittpunkte mit dem Kreis ermittelt. Diese Prozedur wird wiederholt, bis ein benutzerdefinierter Schwellwert, der die minimale Punktzahl im Umkreis des Schnittpunktes festlegt, unterschritten wird.

Ergebnis der Verarbeitungsoperationen sind Fahrspuren, Abb.27. Jede Fahrspur S besteht aus einer Menge äquidistanter Punkte P_i . Die Fahrspurpunkte werden durch Koordinaten im Objektraum und weitere Merkmale charakterisiert. Dazu zählt der Abstand zum vorhergehenden Punkt sowie die Summe der Abstände vom aktuellen bis zum ersten Punkt, Tab.15 im Anhang. Diese Merkmale werden zur Berechnung streckenbezogener Verkehrskenngrößen verwendet.

Diskussion

Zur Festlegung der Verkehrsdatenerfassungsbereiche wird eine möglichst realitätsnahe geometrische Abbildung der von den Verkehrsteilnehmern benutzten Fahrwege bzw. Fahrspuren angestrebt. Mit dem vorgestellten Verfahren können Fahrspuren automatisch festgestellt werden. Die Verwendung der längsten Trajektorie kann für die Fahrspur repräsentativ sein, wenn die Verkehrsobjekttrajektorien räumlich dicht beieinander liegen. Die mittlere Fahrspur repräsentiert jedoch den Fahrspurverlauf besser. Je mehr Trajektorien an dem Klassifikationsverfahren beteiligt sind, desto genauer können die Fahrspuren ermittelt werden.

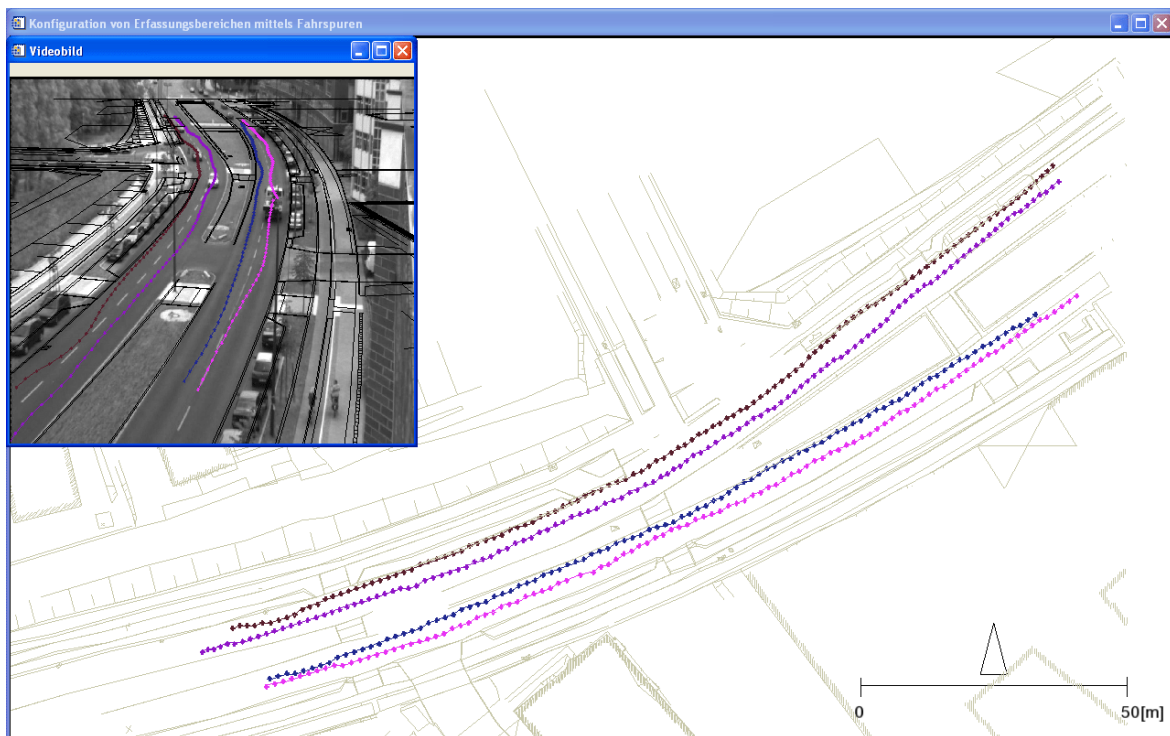


Abb. 27 Mittlere Fahrspuren, aus klassifizierten Verkehrsobjekttrajektorien ermittelt

Fahrspurpartitionierung

Der letzte Schritt zur Festlegung von Erfassungsbereichen mittels Fahrspuren besteht in der Aufteilung der Fahrspuren in einzelne Fahrspurabschnitte bzw. Fahrspursegmente. Auf diese Weise werden auf der Basis von Fahrspuren Erfassungsbereiche erstellt. Die Festlegung der Ausdehnung des Erfassungsbereichs längs zur Fahrspur erfolgt durch eine Aufteilung der Fahrspur in einzelne Fahrspurabschnitte. Fahrspurabschnitte sind Teilmengen FA_i, FA_j, \dots der Punktmengen P_i einer Fahrspur F . Die Fahrspurpunkte eines Fahrspurabschnitts müssen geometrisch aufeinanderfolgen. Die Punkte der Teilmengen einzelner Fahrspurabschnitte sind außerdem paarweise disjunkt, d.h. die besitzen keine gemeinsame Schnittmenge.

$$\emptyset = FA_i \cap FA_j \text{ mit } i \neq j.$$

Die vereinigten Teilmengen der Erfassungsbereiche ergeben wiederum die Gesamtmenge einer Fahrspur.

$$F = \bigcup_i FA_i$$

Die Anzahl der zu einem Fahrspurabschnitt FA_i, FA_j, \dots gehörenden Punkte P_i ist frei wählbar.

Die Breite der Erfassungsbereiche kann durch ein parametrisierbares Abstandsmaß EB_B zu den Fahrspurpunkten beschrieben werden. Dadurch entsteht auf der gesamten Länge der Fahrspur ein Schlauch, Abb.28. Dieser Abstand gilt als Schwelle, bei deren Unterschreitung der Erfassungsbereich topologisch definiert wird. Zur Vereinfachung des Ansatzes ist in der Implementierung der Abstand zu einem Fahrspurpunkt in allen Richtungen gültig. Dadurch entstehen um sämtliche Fahrspurpunkte einer Fahrspur konzentrische Kreise, Abb.28. Jeder Kreis umfasst das topologische Gebiete eines Fahrspurpunktes. Die Kreise aller Fahrspurpunkte, die zu einem Erfassungsbereich gehören, markieren dessen räumliche Ausdehnung. In Abhängigkeit der festgelegten Punktdichte einer Fahrspur und des Kreisdurchmessers kommt es zu räumlichen unterschiedlich großen Überdeckungen der Kreise, Abb.28. Die Abstandsschwelle bzw. die Kreisgröße kann für jeden Erfassungsbereich separat festgelegt werden. Innerhalb eines Erfassungsbereich ist der Kreisdurchmesser jedoch identisch. Die Erfassungsbereiche werden durch eine Identifikationsnummer topologisch festgelegt.

Mit der Aufteilung der Fahrspur in einzelne Segmente und der Festlegung des Abstandsmaßes sind die Erfassungsbereiche definiert. Die Ergebnisse dieser Festlegungen werden in der Datenbank gespeichert, Abb.21.

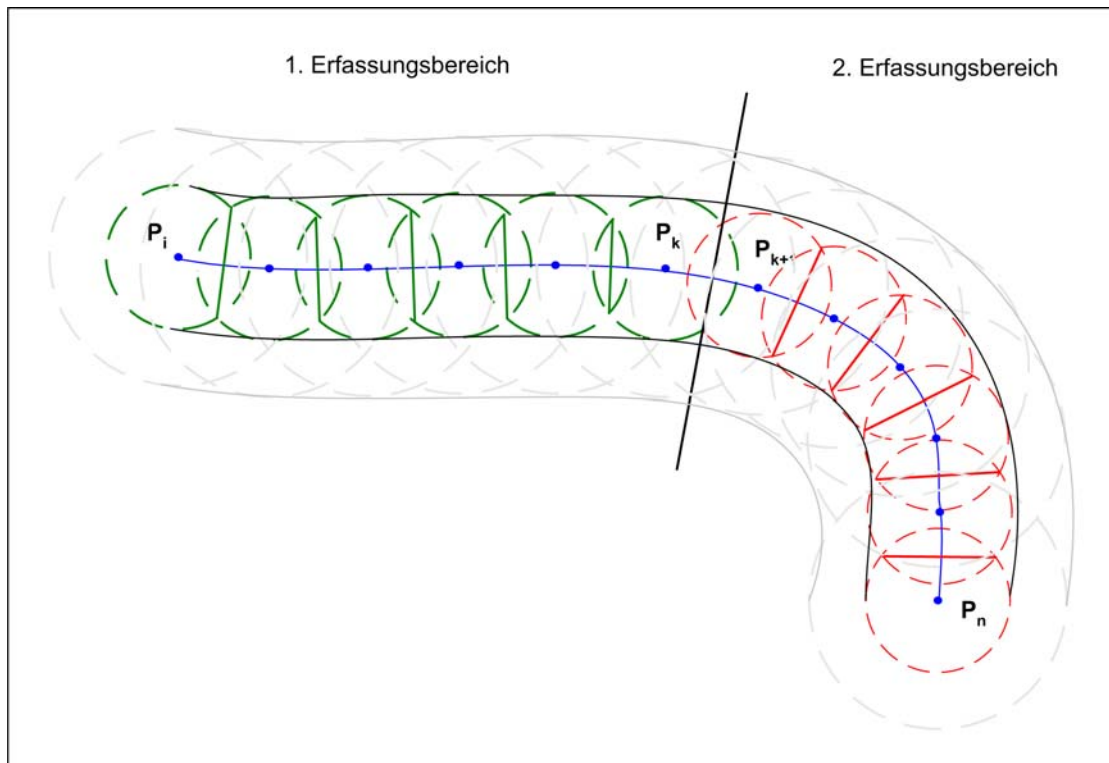


Abb. 28 Festlegung von Erfassungsbereichen mittels Fahrspuren - Längserstreckung: Aufteilung von Fahrspuren in Fahrspursegmente, Quererstreckung: in alle Richtungen gültiges Abstandsmaß (Kreise um Fahrspurpunkte)

Diskussion

Die Festlegung von Erfassungsbereichen anhand automatisch erstellter Fahrspuren erfordert im Vorfeld des operationellen Datenverarbeitungsbetriebs eine Phase, in der das System bis zu einem bestimmten Punkt der Datenverarbeitungskette Testdaten erhebt. Diese Testdaten bestehen aus getrackten und fusionierten Verkehrsobjektdateien aller Sensoren, die den Verkehrsknoten beobachten. Die mittleren Fahrwege der Verkehrsteilnehmer können anhand der Verkehrsobjekttrajektorien in einem Klassifikationsverfahren bestimmt werden. Außerdem können die Länge und Breite von Erfassungsbereichen einer Fahrspur frei definiert werden. Auf dieser Basis ist eine individuelle Anpassung der Erfassungsbereiche an die örtlichen Gegebenheiten möglich. Die beschriebene Vorgehensweise zur Partitionierung der Fahrspuren ermöglicht auch in Kurven eine Ausrichtung der Erfassungsbereiche an den Fahrspurverlauf. Die Anpassungsfähigkeit von Regions of Interest ist bei gekrümmten Fahrbahnen dagegen begrenzt. Während bei der Verwendung des vorgestellten Verfahrens in gekrümmten Fahrspurbereichen ein Erfassungsbereich ausreicht, sind bei der klassischen Vorgehensweise unter Umständen mehrere ROI nötig. Regions of Interest können auch an benachbarten Fahrspuren lückenlos aneinandergelegt werden. Das ist bei der Konfiguration von Erfassungsbereichen mittels Fahrspuren in der vorliegenden Umsetzung jedoch nicht möglich.

5.2.4 Datenverarbeitung

Nachdem die Schritte zur Konfiguration durchlaufen sind, können aus dem Bilddatenstrom der Sensoren im automatischen Datenverarbeitungsbetrieb Verkehrsdaten abgeleitet werden. Dazu sind mehrere aufeinanderfolgende Operationen innerhalb der Verarbeitungskette nötig. In den folgenden Abschnitten wird die Umsetzung des Datenverarbeitungskonzepts auf den logischen Ebenen des Kameraknotens und des Verkehrsknotens beschrieben. Die Datenverarbeitung ist in die Generierung von Verkehrsobjektdaten und die Verkehrskenngrößenberechnung gegliedert, Abb.17. Die Generierung von Verkehrsobjektdaten umfasst die Schritte von der Verkehrsobjektextraktion bis zur Verkehrsobjektdatenfusion. Die Datenverarbeitung beruht dabei auf verschiedenen Methoden. Das sind im einzelnen manuelle Auswertungen, Simulationen und die automatische Bildverarbeitung. Die Beschreibung der Prozesse entspricht nicht exakt der im Datenverarbeitungskonzept beschriebenen Abfolge, sondern orientiert sich an den einzelnen Verfahren zur Datengenerierung. Das betrifft die Verarbeitungsprozesse der Verkehrsobjektextraktion, des Verkehrsobjekttrackings und der Verkehrsobjektfusion. Diese Prozesse werden für die einzelnen Methoden separat betrachtet. Die Geokodierung, Zuordnung von Verkehrsobjekten zu Erfassungsbereichen und die Verkehrskenngrößenberechnung werden im Anschluss erläutert. Sie basieren auf einer einheitlichen Vorgehensweise.

5.2.4.1 Verkehrsobjektdatengenerierung

Verkehrsobjektextraktion, -tracking, -fusion

Am Anfang der Verarbeitungskette steht die Extraktion und Charakterisierung von Verkehrsobjekten aus dem Bilddatenstrom. Anhand dieser Daten werden die nachfolgenden Systemkomponenten innerhalb der Datenverarbeitungskette entwickelt und getestet. Ziel ist es, die einzelnen Verarbeitungsmodule unter realen Bedingungen, d. h. von Verkehrsobjektdaten, die auf Basis der Bildverarbeitung extrahiert werden, zu validieren. Für gewisse Testzwecke sind jedoch auch synthetische Daten sinnvoll. Die eingesetzten Verfahren zur Generierung von Verkehrsobjektdaten sollen an dieser Stelle kurz beschrieben werden.

Manuelle Datenextraktion

Bei der manuellen Verkehrsobjektextraktion erfolgt die Erstellung von Verkehrsobjektdaten aus Bildsequenzen durch einen Benutzer. Das umfasst die manuelle Verfolgung bzw. das Tracking der Objekte im Abbildungsbereich eines Sensors oder auch über mehrere Sensoren, falls sich deren Abbildungsbereiche partiell überlappen. Dazu werden einzelne Bilder nacheinander durch einen geeigneten Bildbetrachter visualisiert und ausgewertet. Als Merkmale der Verkehrsobjekte werden die Bildaufnahmezeitpunkte sowie die Position im Bildraum notiert. Um die Objekte im zeitlichen Verlauf zu verfolgen, wird eine Tracking-ID festgelegt. Bei überlappenden Abbildungsbereichen mehrerer Sensoren wird manuell eine Verkehrsobjektfusion durchgeführt. Im Vorfeld müssen die asynchronen Bilddaten der Sensoren zeitlich synchronisiert werden. Dazu werden ein Zeitstrahl mit äquidistanten Zeitabständen definiert und die Bilddaten anhand des Zeitstempels zugeordnet. Der zeitliche Abstand ist variabel, sollte aber nicht wesentlich höher als die Taktzeit der Aufnahmen sein, sonst wird das gleiche Bild eventuell mehrfach ausgewertet. Im Zuge der Verkehrsobjektfusion erhalten Verkehrsobjekte, die durch mehrere Sensoren im räumlichen und zeitlichen Sinne gleichzeitig erfasst werden, eine identische Tracking-ID.

Im zweiten Schritt der Verkehrsobjektfusion werden Mittelwerte der Objektkoordinaten identischer Verkehrsobjekte berechnet und zusammen mit der Tracking-ID und der Zeitinformation gespeichert. Die ursprünglich extrahierten Verkehrsobjektdaten werden nach der Verkehrsobjektdatenfusion entfernt.

Ergebnis der manuellen Verarbeitung von Bildaufnahmen sind getrackte und im Fall überlappender Sensorabbildungen an einem Verkehrsobjektdaten fusionierte Verkehrsobjektdaten.

Datensimulation

Das Verfahren basiert auf der mikroskopischen Simulation einzelner Verkehrsobjekte anhand von Fahrspuren im Objektraum. Im Gegensatz zu komplexen mikroskopischen Simulationsmodellen arbeitet der Simulator unter deutlich eingeschränkten Randbedingungen. Diese sind im Vorfeld der Simulation durch einen Benutzer festzulegen. Dazu zählt einerseits die Länge bzw. das Zeitintervall der Simulation. Die Geschwindigkeit, mit der Verkehrsobjekte entlang der Fahrspuren bewegt werden, ist ebenfalls variabel einstellbar. Abschließend muss noch ein Schwellwert zum Einsetzen eines Verkehrsobjekts bei Unterschreitung eines Zufallswertes auf der Fahrspur festgelegt werden. Überholvorgänge und Vorfahrtsregeln sind nicht Bestandteil der Simulation. Über einen Zufallsgenerator werden Verkehrsobjekte an den Anfang einer Fahrspur gestellt und mit konstanter Geschwindigkeit entlang der Fahrspur weiterbewegt. Dadurch wird die Verkehrsstärke, d. h. die Anzahl der Verkehrsobjekte und damit die Verkehrsdichte auf den einzelnen Fahrspuren festgelegt. Ein Verkehrsobjekt wird durch unterschiedliche Aktivitätszustände⁵⁴ der Fahrspurpunkte einer Fahrspur dargestellt. Die Geschwindigkeit des Verkehrsobjekts wird für jeden Durchlauf bzw. Zeitpunkt durch Addition eines aufsteigenden Zählers zur aktuellen Position, d. h. des jeweiligen Fahrspurpunktes, realisiert. Die Position des Verkehrsobjekts wird demnach durch Abzählen der Fahrspurpunkte entlang einer Fahrspur festgelegt. Das Zählerintervall ist im Vorfeld durch den Benutzer festzulegen und bestimmt die Geschwindigkeit aller Verkehrsobjekte. Das Ergebnis der Simulation sind Verkehrsobjekttrajektorien.

Bildverarbeitung

Zur Bereitstellung von Verkehrsobjektdaten werden die im Rahmen des Projektes OIS entwickelten Bildverarbeitungsalgorithmen verwendet [Hetzheim, 2004a]. Die Detektion der Verkehrsobjekte beruht auf einer Einteilung und Trennung von Hintergrund- und Vordergrundbild, Abb.29. Als Hintergrundbild wird eine Bildszene ohne Verkehrsobjekte bezeichnet. Das Vordergrundbild besteht dagegen aus den Verkehrsobjekten. Zur Berechnung des Hintergrundbildes wird die Bewegung der Objekte ausgenutzt. Das erfordert die Auswertung von Bildsequenzen. Bei der Hintergrundschätzung werden sukzessive bewegte Objekte entfernt. Das resultierende Bild ist damit ein synthetisches Produkt mehrerer Bildaufnahmen. Die Hintergrundberechnung erfolgt im Vorfeld der Verkehrsobjektdetektion. Sie muss aufgrund der ständig wechselnden Beleuchtungs- und Witterungsbedingungen fortlaufend aktualisiert werden. Die Verkehrsobjektextraktion erfolgt anschließend über einen Vergleich des aktuell aufgenommenen Bildes mit dem Hintergrundbild. Die Charakterisierung der Verkehrsobjekte, erfolgt anhand von Texturmerkmalen [Hetzheim, 2004a]. Aus der Bewegung der Verkehrsobjekte können ebenfalls verkehrsaktive Flächen berechnet werden, Abb.29.

54. Aktiv: Objekt befindet sich auf Fahrspurpunkt. Nicht aktiv: Objekt befindet sich nicht auf Fahrspurpunkt

Im Anschluss an die Verkehrsobjektextraktion erfolgt die Verfolgung der Objekte im Abbildungsbereich eines Sensors. Dazu wird eine kombinierte Auswertung der Positionen im Bild- und Objektraum durchgeführt.

Ergebnis der Bildverarbeitungsoperationen sind extrahierte Verkehrsobjekte. Die Verkehrsobjekte werden außerdem durch Gestaltmerkmale, z. B. Verhältnis Länge zu Breite, charakterisiert. Die Verkehrsobjekte werden anschließend verfolgt bzw. getrackt.

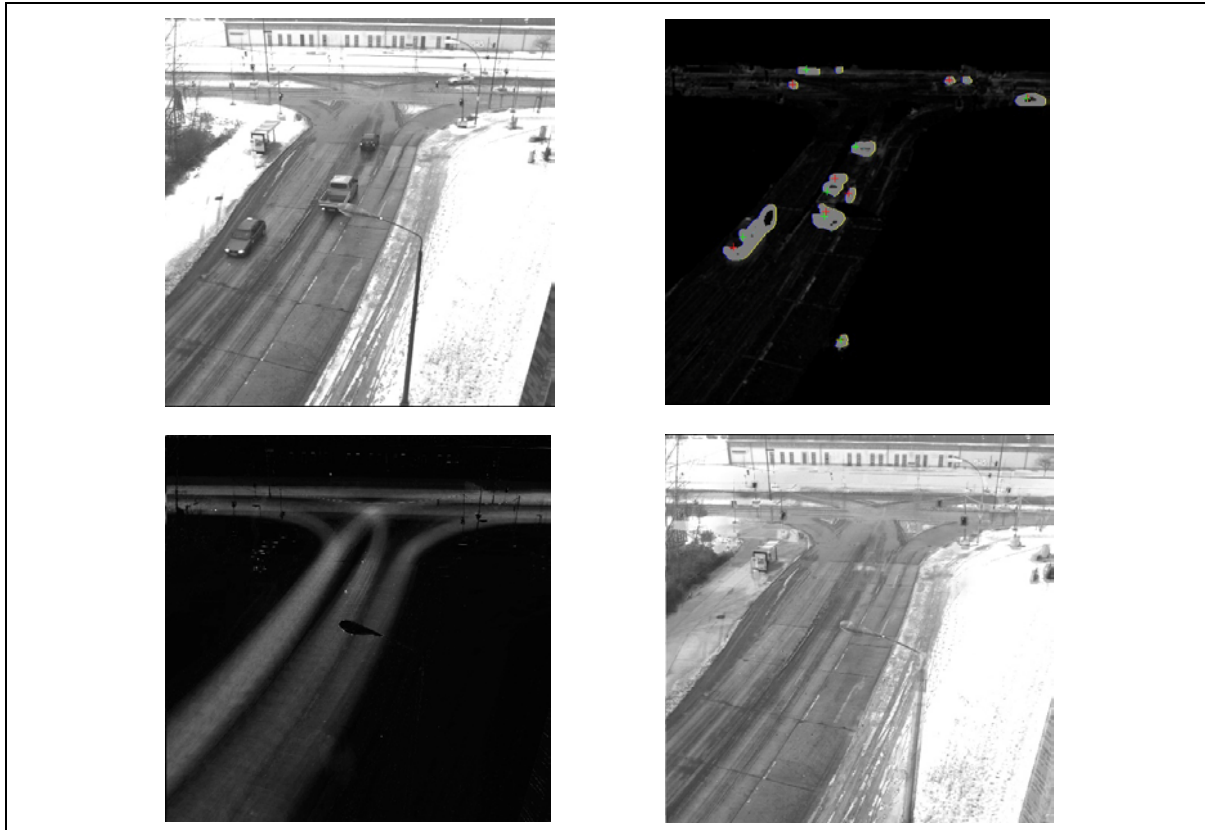


Abb. 29 Verkehrsobjektextraktion durch die Bildverarbeitung, Tagaufnahme VIS-Sensor - (Sensor-ID 1, Tab.5), Links oben: Originalbild, Rechts oben: detektierte Verkehrsobjekte, Links unten: Verkehrsaktive Flächen, Rechts unten: Hintergrundbild (Bildverarbeitung Projekt OIS)



Abb. 30 Verkehrsobjektextraktion durch die Bildverarbeitung, Nachtaufnahme TIR-Sensor - (Sensor-ID 5, Tab.5), Position detektierter Verkehrsobjekte (Kreuze), (Bildverarbeitung Projekt OIS)

Diskussion

Die vorgestellten Methoden zur Extraktion und Weiterverarbeitung von Verkehrsobjektdaten ergänzen sich in verschiedenen Punkten. Im Fall der manuellen Auswertung wird eine Erfassung aller Verkehrsobjekte im zeitlichen Verlauf ihrer Anwesenheit gewährleistet. Die Daten eignen sich deshalb als Referenz zum Vergleich und Bewertung der Algorithmen zur Bildauswertung bzw. der erreichbaren Detektionssicherheit. Letztere wird durch Umwelteinflüsse maßgeblich beeinflusst. Anhand manueller Auswertungen können Verkehrsobjekte unterschiedlicher Sensoren fusioniert und damit räumlich zusammenhängende sensorübergreifende Verkehrsmodelle an einem Verkehrsknoten erstellt werden. Die Schritte zur manuellen Verkehrsdatenextraktion, zum Tracking und zur Verkehrsobjektfusion sind zeitaufwendig und verlangen von dem Benutzer ein hohes Maß an Konzentration. Zur Vereinfachung der Prozedur wurde ein spezieller Bildbetrachter entwickelt, mit dem Bilddaten unterschiedlicher Sensoren gleichzeitig darstell- und auswertbar sind. Der Benutzer kann beliebige Bilder der Bildsequenzen visualisieren sowie Bildkoordinaten und Trackinginformationen der Verkehrsobjekte festlegen. Auf diese Weise wurde anhand einer ca. einminütigen Bildsequenz ein Referenzdatensatz für den Verkehrsknoten Rudower Chaussee - Wededornstraße erstellt. Die Bilddaten wurden ihrer zeitlichen Reihenfolge entsprechend ausgewertet. Zur Positionsbestimmung motorisierter Verkehrsobjekte wurde der Dachmittelpunkt als einheitliche Basis verwendet.

Mit dem manuellen Verfahren werden relativ kleine Datenmengen erstellt. Um die Prozesse zur Verkehrskenngrößenberechnung und zur Datenarchivierung mit größeren Datenmengen über einen längeren Zeitraum zu testen, eignen sich simulierte Verkehrsobjektdaten. Das bereits vorgestellte Verfahren zur automatischen Ermittlung von Fahrspuren bildete die Grundlage der zur Simulation benötigten Fahrspurdaten. Die Simulation beruhte auf realen Fahrspurgeometrien des Verkehrsknotens Rudower Chaussee - Wededornstraße. Aufgrund des einfachen Simulationsansatzes, bei dem sich die Objekte mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, sind jedoch bestimmte Verkehrskenngrößen, z. B. die Aufstelllänge vor einer Haltelinie, nicht ermittelbar.

Die Verkehrsobjektextraktion mit Bildverarbeitungsalgorithmen ermöglicht den Test und die Bewertung von Verarbeitungsoperationen unter realen Bedingungen. Es ist davon auszugehen, dass nicht alle Verkehrsobjekte während des gesamten Zeitraums ihrer Anwesenheit im Abbildungsbereich der Sensoren erfasst werden. Die Auswirkungen unvollständiger Datensätze auf andere Verarbeitungsoperationen kann nur mit Daten überprüft werden, die anhand der Bildverarbeitung erzeugt worden sind. Die im Rahmen des Projektes OIS entwickelten Bildverarbeitungsalgorithmen wurden an Bilddaten unterschiedlicher Sensoren, Standorte Blickrichtungen und Umweltbedingungen getestet. Eine Aussage bezüglich der erreichbaren Detektionssicherheit kann an dieser Stelle nicht getroffen werden. Dazu müssen in Zukunft entsprechende Untersuchungen durchgeführt werden. Die automatische Generierung sensorübergreifender zusammenhängender Verkehrsmodelle auf Verkehrsknotenebene konnte auf Basis der Bildverarbeitung noch nicht realisiert werden.

Geokodierung

Zur Ableitung raumbezogener Verkehrsdaten in einem Weltmodell müssen die extrahierten Verkehrsobjekte geokodiert werden. Das beinhaltet die Transformation von Bild- in Objektkoordinaten eines übergeordneten Koordinatensystems. Eingangsdaten sind die Bildkoordinaten der Verkehrsobjekte, die Parameter der geometrischen Kamerakalibration sowie die äußere Orientierung.

Die Kollinearitätsgleichungen bilden die mathematische Grundlage der Koordinatentransformation. Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten zentralperspektivischer Bildaufnahmen. Anhand der Kollinearitätsgleichungen können Bild- und Objektkoordinaten bidirektional, d.h. in beide Richtungen, transformiert werden. Die bidirektionale Koordinatentransformation unterliegt jedoch gewissen Einschränkungen. Aufgrund der Auswertung monokularer Bildaufnahmen ist die Rekonstruktion von 3D-Objektkoordinaten (X, Y, Z) aus 2D-Bilddaten (ξ, η) der Sensoren nicht möglich.

Die Kollinearitätsgleichungen enthalten die im Zuge der geometrischen Kamerakalibration bereitgestellten Kenngrößen der äußeren und inneren Orientierung sowie die jeweiligen Beobachtungen, d. h. je nach Transformationsrichtung entweder die Bild- oder Objektkoordinaten.

Zur photogrammetrischen 3D-Objektrekonstruktion muss ein Objekt von mindestens zwei unterschiedlichen Standorten aus aufgenommen werden. Die dritte Dimension, d. h. die Tiefeninformation, eines Objekts kann in diesem Fall durch Parallaxenmessung⁵⁵ der Stereoaufnahmen bestimmt werden. Die Auswertung monokularer Bilder schließt jedoch die Ermittlung der Parallaxe aus. 3D-Objekte werden deshalb in einer Projektionsebene abgebildet. Als Projektionsebene wird die Straße definiert. Die Projektionshöhe wird durch einen Benutzer festgelegt. Sie geht als Z in die Kollinearitätsgleichungen ein. Z wird durch das arithmetische Mittel der Passpunkthöhen, die zur Bestimmung der äußeren Orientierung verwendet werden, bestimmt. Die Projektionshöhe bleibt während der Datenverarbeitung in den Kollinearitätsgleichungen unverändert.

Ergebnis der Geokodierung sind Koordinaten der Verkehrsobjekte im Objektraum. Die Koordinaten werden der Merkmalliste hinzugefügt, mit der ein Verkehrsobjekt charakterisiert wird, Abb.18-19.

55. scheinbare Änderungen der Position eines beobachteten Objekts durch eine Verschiebung der Position des Beobachters [www-Parallaxe]

Für die Transformation von Koordinaten gilt nach (Krauss, 1994):

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \times \frac{r_{11} \times (\xi - \xi_0) + r_{12} \times (\eta - \eta_0) - r_{13} \times c}{r_{31} \times (\xi - \xi_0) + r_{32} \times (\eta - \eta_0) - r_{33} \times c}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \times \frac{r_{21} \times (\xi - \xi_0) + r_{22} \times (\eta - \eta_0) - r_{23} \times c}{r_{31} \times (\xi - \xi_0) + r_{32} \times (\eta - \eta_0) - r_{33} \times c}$$

$$\xi = \xi_0 - c \times \frac{r_{11} \times (X - X_0) + r_{21} \times (Y - Y_0) + r_{31} \times (Z - Z_0)}{r_{13} \times (X - X_0) + r_{23} \times (Y - Y_0) + r_{33} \times (Z - Z_0)}$$

$$\eta = \eta_0 - c \times \frac{r_{12} \times (X - X_0) + r_{22} \times (Y - Y_0) + r_{32} \times (Z - Z_0)}{r_{13} \times (X - X_0) + r_{23} \times (Y - Y_0) + r_{33} \times (Z - Z_0)}$$

mit

X, Y, Z = Koordinaten im Objektraum,

ξ, η = Koordinaten im Bildraum,

X_0, Y_0, Z_0 = Objektkoordinaten des Aufnahmeortes (äußere Orientierung),

$r_{11} \dots r_{33}$ = Elemente der Rotationsmatrix (äußere Orientierung),

ξ_0, η_0 = Koordinaten des Bildhauptpunktes (innere Orientierung),

c = Kamerakonstante bzw. Brennweite des Objektivs (innere Orientierung).

Diskussion

Im Rahmen der Datenverarbeitungskette werden primär die Bildkoordinaten der Verkehrsobjekte in Objektkoordinaten transformiert. Zur Ergebnisvisualisierung werden allerdings Verkehrsdaten und diverse geometrische Objekte, z. B. Erfassungsbereiche und digitale Karte, in den Bilddaten dargestellt. Dazu ist eine Koordinatentransformation in der entgegengesetzten Richtung, d. h. von Objektkoordinaten in Bildkoordinaten, nötig.

Verkehrsobjekte, die sich nicht auf der Projektionshöhe befinden, werden verzerrt in der Projektionsebene abgebildet, Abb.31. Die Größe des Projektionsfehlers bzw. das Abweichen zwischen projizierter und realer Objektposition hängt von der Position und Höhe des Durchstoßpunktes des Blickstrahls durch das Verkehrsobjekt, der Höhe des Sensors über der Projektionsebene und dessen Abstand zum Verkehrsobjekt. Es gilt folgende Beziehung:

$$\frac{hs}{l_1} = \frac{hd}{l_2}$$

Eine Korrektur der ermittelten Objektkoordinaten ist nur anhand von a priori Kenntnissen bezüglich der Höhe des Durchstoßpunktes durch das Verkehrsobjekt möglich. Diese Information ist jedoch durch die Bildverarbeitung nicht ohne weiteres ableitbar.

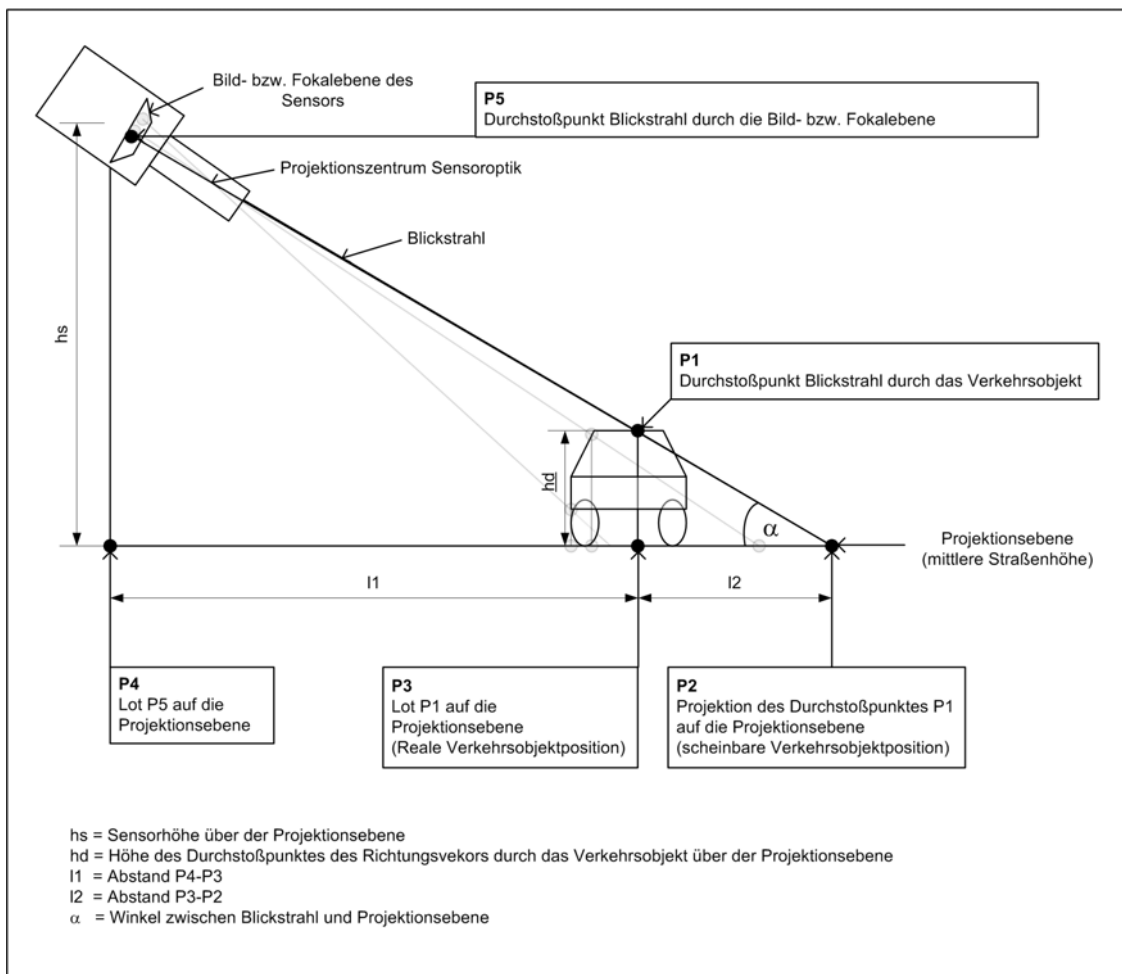


Abb. 31 Projektion von 3D-Objekten in eine Ebene

5.2.4.2 Verkehrskenngrößenberechnung

Nachdem die Verkehrsobjekte im ersten Teil der Datenverarbeitung generiert worden sind, können im Anschluss die Verkehrskenngrößen berechnet werden. Die dazu notwendigen Operationen sind auf der logischen Ebene des Verkehrsknotens angesiedelt. Zunächst erfolgt die Zuordnung der Verkehrsobjekte zu Erfassungsbereichen. Anschließend werden die Verkehrskenngrößen berechnet.

Zuordnung von Verkehrsobjekten zu Erfassungsbereichen durch Fahrspurtracking

Die Datenverarbeitung beginnt mit der Zuordnung von Verkehrsobjekten zu Erfassungsbereichen. Die Vorgehensweise beruht nicht auf dem klassischen Verfahren der Zuordnung zu Regions of Interest sondern auf einem alternativen Verfahren. Dieses Verfahren wird als Fahrspurtracking bezeichnet. Ein Verkehrsobjekt wird dabei einzelnen Punkten der bereits beschriebenen Fahrspuren zugeordnet. Durch das Fahrspurtracking wird ein Verkehrsobjekt gleichzeitig einer Fahrspur und einem Erfassungsbereich zugeordnet.

Anhand der Zuordnung von Verkehrsobjekten zu Erfassungsbereichen werden die Verkehrsteilnehmer in einen räumlichen Zusammenhang gestellt. Das ist Voraussetzung zur Berechnung von Verkehrskenngrößen.

Eingangsdaten für das Fahrspurtracking sind die Geometriedaten der Fahrspuren, Angaben zu den Erfassungsbereichen, sowie die Koordinaten der Verkehrsobjekte im Ortsraum.

Im ersten Schritt wird die euklidische Distanz L_{ij}^A des Verkehrsobjekts VO_i zu jedem Punkt P_j^A einer Fahrspur A bestimmt, Abb.32 Oben.

$$L_{ij}^A = \sqrt{(X_i - X_j^A)^2 + (Y_i - Y_j^A)^2}$$

mit

(X_i, Y_i) = Objektkoordinaten des Verkehrsobjekts VO_i ,

(X_j^A, Y_j^A) = Objektkoordinaten des Punktes P_j^A der Fahrspur A .

Anschließend wird der Fahrspurpunkt P_i einer Fahrspur A mit dem kleinsten Abstand L_j^A aus allen L_{ij}^A zum Verkehrsobjekt VO_i ermittelt, Abb.32 Unten.

$$L_j^A = \min(L_{ij}^A)$$

mit

j = Punktindex der Fahrspur A .

Durch die festgelegte Breite EB_B eines Erfassungsbereichs wird die Abstandsschwelle für die Zuordnung eines Verkehrsobjekts VO zu einem Fahrspurpunkt P_i und damit zu einem Erfassungsbereich EB definiert. Bei Unterschreitung des Schwellwertes EB_B wird das Verkehrsobjekt dem Fahrspurpunkt P_i einer Fahrspur A mit dem minimalen Abstand L_j^A zugeordnet. Ein Verkehrsobjekt kann deshalb zum Bildaufnahmezeitpunkt nur einem Fahrspurpunkt P_j^A einer Fahrspur A zugeordnet werden. Die beschriebene Prozedur bezüglich der Zuordnung eines Verkehrsobjekts zu einem Fahrspurpunkt einer Fahrspur wird für alle weiteren Fahrspuren wiederholt.

Dadurch kann ein Verkehrsobjekt zu einem Bildaufnahmezeitpunkt mehreren Fahrspuren gleichzeitig zugeordnet werden. In Abb.32 ist die Zuordnung von Verkehrsobjekten grafisch dargestellt. In dem Beispiel werden die Verkehrsobjekte VO1 und VO2 dem ersten Erfassungsbereich (grün), das Verkehrsobjekt VO4 dem 2. Erfassungsbereich (rot) zugeordnet. Das Verkehrsobjekt VO3 wird nicht zugeordnet, da es sich außerhalb des Erfassungsbereichs befindet.

Ergebnis der Verarbeitungsoperationen sind Fahrspuren, Fahrspurenabschnitten bzw. Erfassungsbereichen und Fahrspurpunkten zugeordnete Verkehrsobjekte, Abb.18-19. Die generierten Daten werden dem nachfolgenden Datenverarbeitungsmodul zur Berechnung der Verkehrskenngrößen übergeben.

Diskussion

Das Fahrspurtracking zeichnet sich gegenüber der klassischen Auswertung mittels Regions of Interest durch zwei wesentliche Vorteile aus. Die Erfassungsbereiche werden auf eine eindimensionale Form zurückgeführt. Die Berechnung von Verkehrskenngrößen wird dadurch vereinfacht. Die Erfassungsbereiche können außerdem an Fahrbahnkrümmungen besser angepasst werden. Durch die Zuordnung eines Verkehrsobjekts zu mehreren Fahrspuren kann außerdem im zeitlichen Verlauf dessen Fahrspurwechselverhalten abgebildet werden.

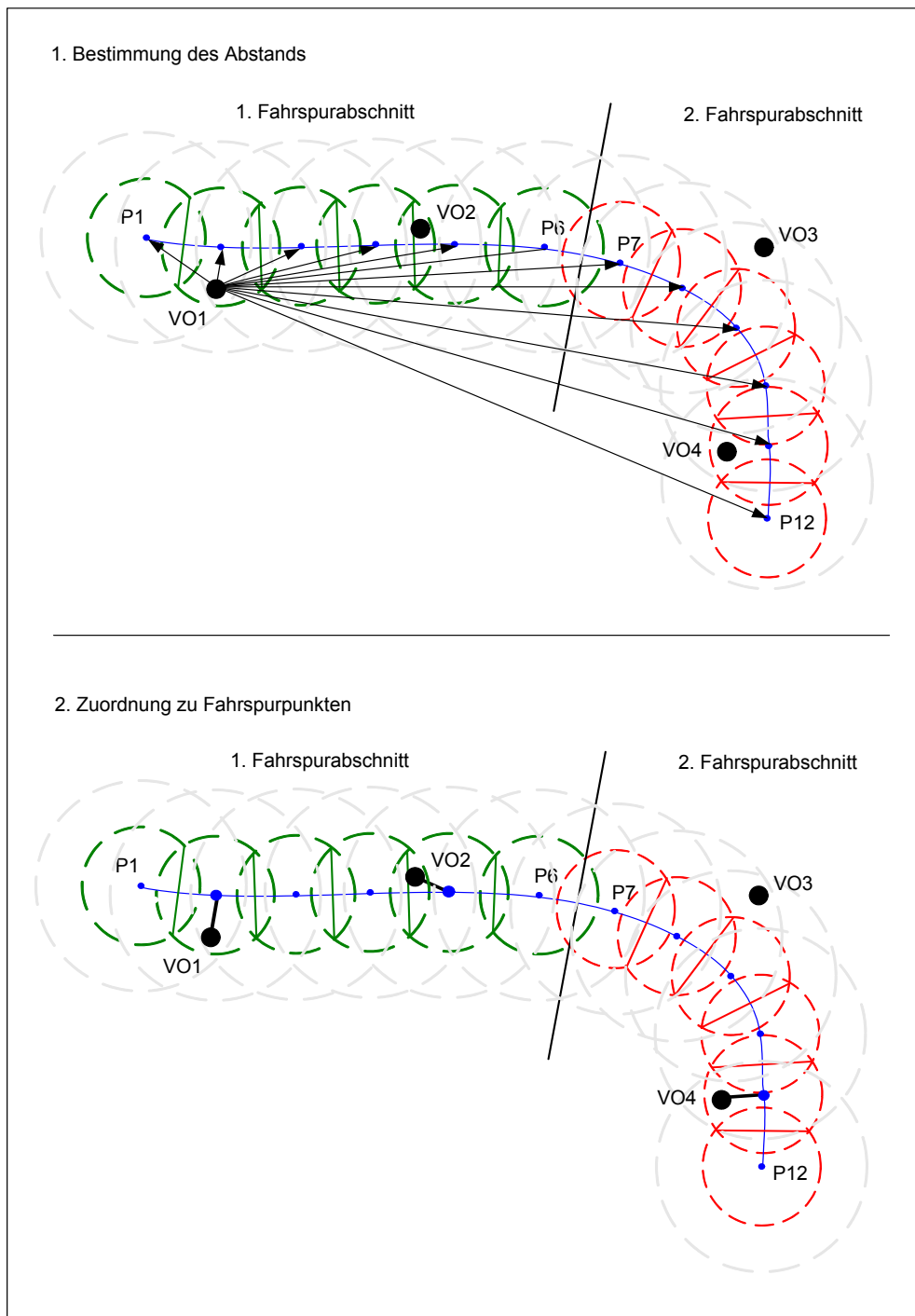


Abb. 32 Zuordnung von Verkehrsobjekten (schwarz) zu Fahrspurpunkten (blau), Erfassungsbereichen (grün, rot) und Fahrspuren (blau)

Verkehrskenngrößen

Nachdem die vorgestellten Module der Datenverarbeitungskette durchlaufen sind, können die Verkehrskenngrößen berechnet werden. Die Einteilung der Verkehrskenngrößen erfolgt nach zeitlichen und räumlichen Kriterien. Unter zeitlichen Aspekten werden primäre und sekundäre Verkehrskenngrößen unterschieden. Primäre und sekundäre Verkehrskenngrößen werden weiter unter räumlichen Gesichtspunkten in verkehrsobjekt-, erfassungsbereichs- und fahrspurbezogene Verkehrskenngrößen eingeteilt. Die Verkehrskenngrößenberechnung erfolgt auf der logischen Ebene des Verkehrsknotens. Anhand der Eingangsdaten können räumliche Verkehrsmodelle des Verkehrsknotens in dem festgelegten Weltmodell erstellt werden.

Primäre Verkehrskenngrößen

Primäre Verkehrskenngrößen werden zu jedem Bildaufnahmezeitpunkt aus den extrahierten Verkehrsobjekten des Bilddatenstroms ermittelt. Zur Kenngrößenberechnung werden die während des Fahrspurtracking erzeugten Daten, die Fahrspurgeometrien sowie die Informationen bezüglich der Erfassungsbereiche, herangezogen. Die Datenauswahl zur Verkehrskenngrößenberechnung erfolgt anhand einer benutzerdefinierten Zeitintervallvorgabe t_{MinMax} innerhalb des GIS. Anhand der Eingangsdaten werden verkehrsobjekt-, erfassungsbereichs- und fahrspurbezogene Verkehrskenngrößen ermittelt.

Ergebnis der Verarbeitungsoperationen sind Daten primärer Verkehrskenngrößen mit Verkehrsobjekt- und Erfassungsbereichsbezug. Die erzeugten Daten werden in der Datenbank des Verkehrsknotens gespeichert.

Verkehrsobjektbezug

Bei verkehrsobjektbezogenen Kenngrößen wird das einzelne Verkehrsobjekt betrachtet. Es werden die momentane Verkehrsobjektgeschwindigkeit und der Abstand zwischen Verkehrsobjekten entlang der Fahrspur, denen die Verkehrsobjekte zugeordnet sind, bestimmt.

Momentane Verkehrsobjektgeschwindigkeit

Die momentane Verkehrsobjektgeschwindigkeit v_{VO} gibt die aktuelle Geschwindigkeit des Verkehrsobjekts zum Zeitpunkt t an. Dazu wird der Abstand L_{VO} zwischen den Positionen (X_i, Y_i) des Verkehrsobjekts aufeinanderfolgender Bildaufnahmezeitpunkte t und $t-1$ bestimmt und durch das Zeitintervall dividiert.

$$v_{VO} = \frac{L_{VO}}{\Delta t}$$

mit

$$\Delta t = \frac{1}{f} \quad , \quad f = \text{Bildaufnahmefrequenz} .$$

Abstand aufeinanderfolgender Verkehrsobjekten

Der Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Verkehrsobjekten einer Fahrspur wird anhand der Fahrspurpunkte, denen die Verkehrsobjekte im Zuge des Fahrspurtracking zugeordnet worden sind, bestimmt. Für jedes Verkehrsobjekt wird der Abstand zum vorausfahrenden und nachfolgenden Verkehrsobjekt zum Zeitpunkt t bestimmt.

$$L_{VO_{\text{vorne} / \text{hinten}}} = |L_{P_1 P_i} - L_{P_1 P_j}|$$

mit

$L_{P_1 P_i}$ = Abstand zweier Punkte P_1 und P_i einer Fahrspur zum Zeitpunkt t ,

P_1 = Erster Punkt einer Fahrspur,

P_i = Fahrspurpunkt, dem das Verkehrsobjekt zugeordnet ist,

P_j = Fahrspurpunkt, dem das benachbarte Verkehrsobjekt zugeordnet ist.

Erfassungsbereichsbezug

Zur Ermittlung erfassungsbereichsbezogener Kenngrößen werden alle Verkehrsobjekte innerhalb eines Erfassungsbereichs betrachtet. Dadurch sind einerseits Beziehungen, z. B. Abstände, zwischen einzelnen Verkehrsobjekten herstellbar und andererseits aggregierte Daten, z. B. Verkehrsdichte, ableitbar.

Mittlere Momentangeschwindigkeit

Als mittlere Momentangeschwindigkeit \bar{v}_{EB} wird die durchschnittliche Geschwindigkeit aller Verkehrsobjekte, die sich zum Zeitpunkt t innerhalb eines Erfassungsbereichs EB befinden, definiert. Dazu wird das arithmetische Mittel der momentanen Verkehrsobjektgeschwindigkeiten aller Verkehrsobjekte innerhalb des betrachteten Erfassungsbereichs berechnet.

$$\bar{v}_{EB} = \frac{\sum_{k=1}^N v_{VO}^k}{N}$$

mit

v_{VO}^k = Momentane Verkehrsobjektgeschwindigkeit,

N = Anzahl der Verkehrsobjekte im Erfassungsbereich.

Verkehrsdichte

Als Verkehrsdichte D_{EB} wird die Anzahl der Verkehrsobjekte, die sich in einem definierten Erfassungsbereich befinden, bezeichnet.

$$D_{EB} = \frac{\sum_{k=1}^N v_{VO}^k}{L_{P_1 P_i}}$$

mit

VO = Verkehrsobjekt,

N = Anzahl Verkehrsobjekte in einem Erfassungsbereich EB zum Zeitpunkt t ,

$L_{P_1 P_i}$ = Länge des Erfassungsbereichs,

P_1, P_i = Erster bis letzter Fahrspurpunkt des Erfassungsbereichs.

Anschließend wird die Verkehrsdichte D , bezogen auf 1000m, ermittelt.

Belegungsgrad

Der Belegungsgrad gibt das Verhältnis zwischen der tatsächlichen Anzahl und der maximal möglichen Verkehrsobjektanzahl in einem Erfassungsbereich an.

$$B_{EB} = \frac{\sum_{k=1}^N VO^k}{VO_{Max_{EB}}}$$

mit

VO = Verkehrsobjekt,

N = Anzahl Verkehrsobjekte in einem Erfassungsbereich EB zum Zeitpunkt t ,

$VO_{Max_{EB}}$ = Maximal mögliche Anzahl Verkehrsobjekte im Erfassungsbereich.

Fahrspurbezug

Die Aufstelllänge ist eine den Erfassungsbereichen im räumlichen Sinne übergeordnete Kenngröße mit Fahrspurbezug. Die Aufstelllänge L^A_{AL} an einer Fahrspur A wird durch das letzte Verkehrsobjekt, das sich in einer Reihe von Verkehrsobjekten mit geringer momentaner Verkehrsobjektgeschwindigkeit v_{VO} vor der Haltelinie befindet, definiert. Dazu ist ein Schwellwert $S_{v_{VO}}$, der die minimale momentane Verkehrsobjektgeschwindigkeit definiert, im Vorfeld der Kenngrößenberechnung durch einen Benutzer festzulegen. Bei Unterschreitung des Schwellwertes wird der Abstand zur Haltelinie und damit die Aufstelllänge festgestellt.

Sekundäre Verkehrskenngrößen

Sekundäre Verkehrskenngrößen sind aus primären Kenngrößen abgeleitete, zeitlich aggregierte Verkehrsdaten. Analog zur Bestimmung primärer Kenngrößen werden verkehrsobjektspezifische, erfassungsbereichsbezogene sowie fahrspurbezogene Kenngrößen erfasst. Die Zeitintervalle zur Datenaggregation sind kenngrößenabhängig. Verkehrsobjektspezifische Größen werden berechnet, nachdem das Verkehrsobjekt den Abbildungsbereich eines Sensors bzw. überlappende Abbildungsbereiche mehrerer Sensoren verlassen hat. Erfassungsbereichsbezogene und fahrspurbezogene Kenngrößen werden dagegen in festen einminütigen Intervallen berechnet.

Ergebnis der Verarbeitungsoperationen sind verkehrsobjektspezifische, erfassungsbereichsbezogene und fahrspurbezogene Verkehrsstatistiken. Die Daten werden ebenfalls in der Datenbank des Verkehrsknotens gespeichert.

Verkehrsobjektbezug

Die Kenngrößen werden abgeleitet, nachdem das Verkehrsobjekt den Abbildungsbereich des Sensors bzw. mehrerer Sensoren mit überlappenden Abbildungsbereichen verlassen hat oder wenn es sich noch im Abbildungsbereich befindet aber nicht mehr von der Bildverarbeitung detektiert wird.

Mittlere Verkehrsobjektgeschwindigkeit

Die mittlere Verkehrsobjektgeschwindigkeit \bar{v}_{VO} wird aus dem arithmetischen Mittel der momentanen Verkehrsobjektgeschwindigkeiten v_{VO} des Verkehrsobjekts, die es im Verlauf seiner Detektion aufweist, berechnet.

$$\bar{v}_{VO} = \frac{\sum_{k=i}^N v_{vo}^k}{N}$$

mit

i = Startzeitpunkt,

j = Endzeitpunkt,

N = Anzahl Werte ($j - i + 1$).

Reisezeit

Als Reisezeit R_{VO} wird die Zeitdauer festgelegt, innerhalb derer ein Verkehrsobjekt durch die Sensoren an einem Verkehrsknoten erfasst bzw. detektiert wird.

$$R_{VO} = t_{max} - t_{min}$$

mit

t_{min} = Beginn der Anwesenheit

t_{max} = Ende der Anwesenheit

Fahrtrichtung

Zur Bestimmung der Fahrtrichtung wird die Zuordnung eines Verkehrsobjekts zu Fahrspuren im zeitlichen Verlauf der Anwesenheit herangezogen. Es wird die Fahrspur-ID ermittelt, der das Verkehrsobjekt am häufigsten zugeordnet wurde. Dazu wird der Modalwert⁵⁶ aus den Fahrspur-ID's bestimmt.

Anzahl Fahrspurwechsel

Die Anzahl der Fahrspurwechsel kann ebenfalls aus den Fahrspur-ID's, denen ein Verkehrsobjekt während seiner Anwesenheit im Abbildungsbereich der Sensoren zugeordnet wurden, bestimmt werden.

56. d. h. der häufigste Wert einer Häufigkeitsverteilung

Erfassungsbereichsbezug

Mittlere Verkehrsgeschwindigkeit

Die mittlere Verkehrsgeschwindigkeit \bar{v}_{EB} innerhalb eines Erfassungsbereichs wird über das arithmetische Mittel der momentanen Verkehrsobjektgeschwindigkeiten in einem Zeitintervall bestimmt.

$$\bar{v}_{EB} = \frac{\sum_{k=1}^N v_{VO}^k}{N}$$

mit

i = Startzeitpunkt,

j = Endzeitpunkt,

N = Anzahl Werte ($j - i + 1$).

Mittlere Verkehrsdichte

Eine weitere erfassungsbereichsspezifische Kenngröße ist die mittlere Verkehrsdichte \bar{D}_{EB} . Sie wird aus dem arithmetische Mittel der Verkehrsdichte in einem Zeitintervall berechnet.

$$\bar{D}_{EB} = \frac{\sum_{k=1}^N D_{EB}^k}{N}$$

mit

i = Startzeitpunkt,

j = Endzeitpunkt,

N = Anzahl Werte ($j - i + 1$).

Mittlerer Belegungsgrad

Aus der Belegung eines Erfassungsbereichs im zeitlichen Verlauf wird der mittlere Belegungsgrad \bar{B}_{EB} berechnet.

$$\bar{B}_{EB} = \frac{\sum_{k=1}^N B_{EB}^k}{N}$$

mit

i = Startzeitpunkt,

j = Endzeitpunkt,

N = Anzahl Werte ($j - i + 1$).

Fahrspurbezug

Maximale Aufstelllänge

Die maximale Aufstelllänge L^A_{ALmax} wird in einem Zeitintervall aus den Werten der Aufstelllänge L^A_{AL} an einer Fahrspur A ermittelt.

$$L^A_{ALmax} = \max(L^A_{AL})$$

Diskussion

Anhand der vorgestellten Prozesse können Verkehrsdatenmodelle unterschiedlicher räumlicher Kategorien erstellt werden. Die unterste räumliche Kategorie wird durch den Abbildungsbereich eines einzelnen Sensors repräsentiert. Damit kann das Verkehrsgeschehen innerhalb eines Ausschnitts an einem Verkehrsknoten abgebildet werden. Um einen gesamten Verkehrsknoten zu erfassen, werden die Verkehrsdaten einzelner Sensoren zu einem übergeordneten räumlichen Datenmosaik zusammengesetzt. Damit können Verkehrsdatenmodelle bis zur zweiten logischen Ebene (Verkehrsknoten) erstellt werden.

Sekundäre Kenngrößen, deren Aggregationsintervalle den Umlaufzeiten von Lichtsignalanlagen angepasst sind, widerspiegeln die Verkehrsabläufe wesentlich realitätsnäher als Kenngrößen, bei denen die Aggregationsintervalle von der Aktorik entkoppelt sind. Deshalb wurden Funktionen realisiert, mit denen ein Benutzer archivierte Verkehrsobjektdaten zur Verkehrskenngrößenberechnung gezielt auswählen kann. Dadurch können sekundäre Verkehrskenngrößen an lichtsignalanlagenbezogene Zeitintervalle angepasst werden. Im operationellen Datenverarbeitungsbetrieb ist die manuelle Datenauswahl zur Berechnung sekundärer Kenngrößen nicht möglich. Zur Ableitung LSA-phasenumlaufbezogener Verkehrskenngrößen müssten die Algorithmen des Sensorsystems an die Phasenumlaufpläne der Lichtsignalanlagen gekoppelt sein.

Die abgeleiteten Verkehrskenngrößen liegen im metrischen System eines geografischen Koordinatensystems mit globaler räumlicher Gültigkeit vor. Die Verkehrskenngrößen können damit prinzipiell zeitlich-räumlich mit den Daten anderer Verkehrsapplikationen synchronisiert und von diesen Anwendungen verwendet werden. Durch die Standardisierung der Erfassungsbereiche sind die Verkehrskenngrößen außerdem untereinander vergleichbar. Aufgrund der variabel einstellbaren Erfassungsbereichsgröße können sowohl herkömmliche querschnittsbezogene als auch streckenbezogene Verkehrskenngrößen direkt aus den Bilddaten ermittelt werden. Die streckenbezogenen Kenngrößen können verwendet werden, um neben der Hauptanwendung, der Lichtsignalanlagensteuerung, auch sehr spezielle verkehrsrelevante Fragestellungen zu beantworten. Beispielsweise lässt sich anhand der Daten das Fahrspurwechsel- und Abbiegeverhalten der Verkehrsteilnehmer quantifizieren.

5.3 Ergebnisdarstellung

Die innerhalb der Verarbeitungskette erzeugten Daten sollen in geeigneter Weise dargestellt werden. In Anlehnung an die formulierten Anforderungen an das Messsystem wurde ein spezielles Modul zur 4D-Datendarstellung umgesetzt. Mit diesem GIS-Modul können sowohl Konfigurationsdaten als auch die Ergebnisse der Datenverarbeitung visualisiert werden, Abb.33. Durch ein spezielles Wiedergabeverfahren sind archivierte Datenbestände unterschiedlicher Verarbeitungsebenen, von einzelnen Verkehrsobjekten bis zu statistischen Größen, im zeitlichen Verlauf darstellbar. Verkehrsabläufe können dadurch nachträglich in ihrer zeitlichen und räumlichen Dynamik rekonstruiert und bewertet werden. Die folgenden Ausführungen dienen der Beschreibung des Funktionsumfangs dieses GIS-Moduls, das im Rahmen der Arbeit erstellt wurde.

Zur Darstellung werden statische und dynamische Daten verwendet. Statische Daten besitzen eine hohe räumlich-zeitliche Persistenz, dynamische Daten zeichnen sich in diesen Punkten durch eine geringe Persistenz aus. Statische Daten bilden den kartografischen Rahmen der Darstellung bzw. das Verkehrsknotenlayout. Das Verkehrsknotenlayout besteht einerseits aus geometrischen Daten, die den Verkehrsraum räumlich im Weltkoordinatensystem beschreiben. Zur räumlichen Repräsentation des Testgebietes wird eine geokodierte Karte⁵⁷ verwendet. Auf der anderen Seite bietet sich zur Darstellung des Verkehrsraums die Verwendung von Bildaufnahmen der Sensoren an. Das Verkehrsknotenlayout besteht weiterhin aus den im Rahmen der Konfiguration von Erfassungsbereichen abgeleiteten Daten. Das sind im einzelnen Fahrspuren sowie Erfassungsbereiche zur Verkehrskenngrößenberechnung. Dynamische Daten beinhalten die Verkehrsobjekte sowie primäre und sekundäre Verkehrskenngrößen. Diese Daten sind zeitlich-räumlich sehr variabel. Aufgrund des geografisch-räumlichen Bezugs können diese Daten in das Verkehrsknotenlayout integriert werden.

Als Datengrundlage dienen archivierte Verkehrsobjektdaten, Verkehrskenngrößen und Konfigurationsdaten, die in den einzelnen Datenspeichern verwaltet werden, Abb.17. Die Wiedergabe einzelner Datensätze, mit denen eine Verkehrsszene zu einem definierten Bildaufnahmezeitpunkt beschrieben wird, ist sowohl manuell als auch automatisch möglich. Bei dem manuellen Wiedergabeverfahren kann ein Benutzer einzelne Datensätze unterschiedlicher Bildaufnahmezeitpunkte aus den Datenspeichern auswählen. Die Anzeige der Daten kann in unterschiedlichen Zeitschritten erfolgen. Die Verkehrsobjekte und Verkehrskenngrößen sind im zeitlichen Sinne bidirektional darstellbar. Beim automatischen Wiedergabeverfahren werden die ausgewählten Verkehrsszenen dagegen automatisch, entsprechend ihrer zeitlichen Abfolge, visualisiert. Die Auswahl der Daten erfolgt in diesem Fall über die Festlegung eines Zeitintervalls durch den Benutzer. Dazu wird das Minimum und Maximum der Zeiteinträge automatisch aus dem ausgewählten Datenspeicher ermittelt. Der Benutzer kann innerhalb dieser Einträge Zeitintervalle für das Einspielen der Verkehrsszenen festlegen. Anhand der Auswahl wird automatisch der dazustellende Ausschnitt der geokodierten Karte ermittelt.

57. CAD-Modell

Im Vorfeld der Wiedergabe muss ein Sensorbild und die dazugehörige geometrische Kamerakalibration ausgewählt werden. Die geometrische Kamerakalibration wird zur räumlich-zeitlich synchronisierten Darstellung der Daten sowohl in der geokodierten Karte als auch im Bild benötigt. Voraussetzung der synchronisierten Visualisierung ist die Transformation der darzustellenden Daten vom Objekt- in den Bildraum. Zur Veranschaulichung des räumlichen Zusammenhangs werden die geometrischen Elemente der geokodierten Karte in das Sensorbild projiziert, Abb.33.

Die Fahrspuren und Erfassungsbereiche werden ebenfalls in das Bild und den digitalen Kartenausschnitt eingebettet. Während der Datenwiedergabe werden Verkehrsobjekte und Verkehrsdaten im Bild und der Karte zeitsynchron dargestellt. Die Visualisierung der Daten erfolgt auf symbolischer Ebene. Das beinhaltet z. B. die Darstellung der Verkehrsobjekte mit Fahrtrichtungsanzeige oder die Visualisierung von Verkehrsobjekttrajektorien.

Innerhalb der digitalen Karte und des Sensorbildes können für einzelne Bildaufnahmezeitpunkte nachträglich manuell Verkehrskenngößen bestimmt werden. Dazu stehen interaktive Funktionen zur Datenanalyse zur Verfügung. Diese beinhalten Werkzeuge zur Messung von Koordinaten und Strecken im Objektraum. Die Anzeige der Interaktionen erfolgt ebenfalls zeitsynchron im Bild und in der digitalen Karte.

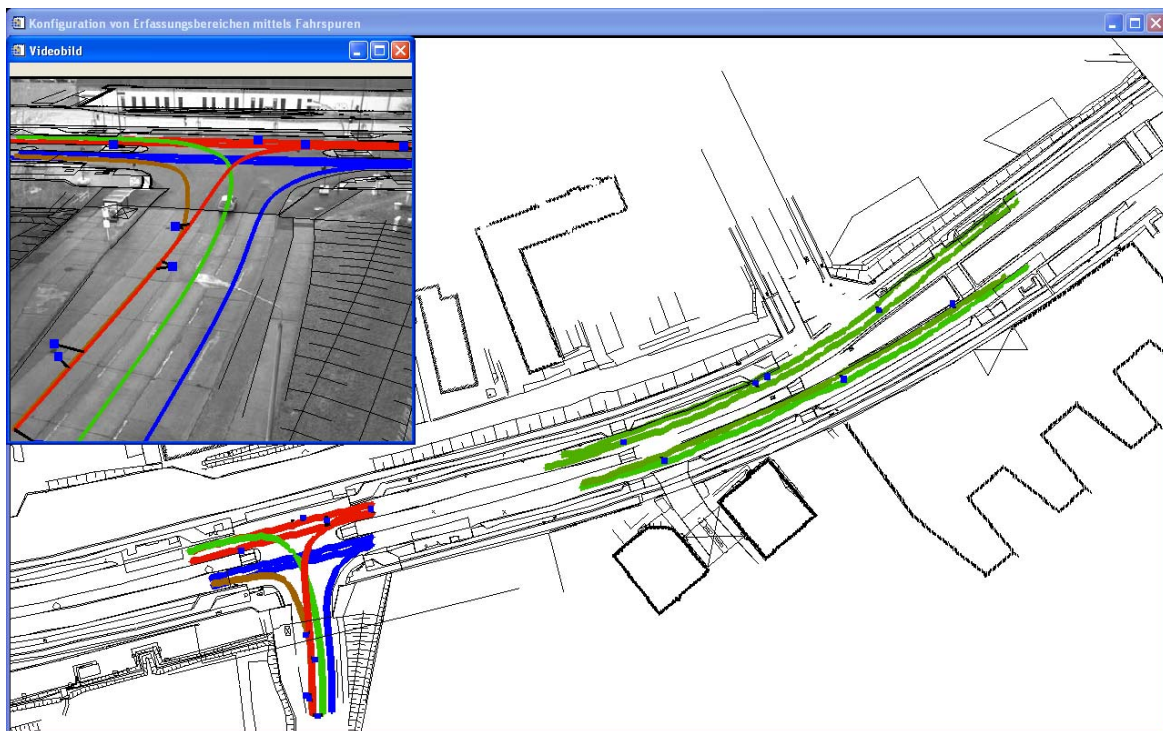


Abb. 33 Rekonstruktion von Verkehrsszenen, aus den Daten zweier Sensoren (Sensorstandort-ID 1,2, Abb.11) zusammengesetztes Verkehrsdatenmodell an einem Verkehrsknoten - Ausschnitt geokodierte Karte und Bild mit Projektion der digitalen Karte, Fahrspuren (Farben repräsentieren unterschiedliche momentane Belegungsgrade (grün = geringer Belegungsgrad, rot = hoher Belegungsgrad), blau = keine Belegung), Verkehrsobjekte (Vierecke)

Diskussion

Anhand der Visualisierungsfunktionen können einzelne Verkehrsszenen auf der räumlichen Ebene des Verkehrsknotens nachträglich aus archivierten Daten rekonstruiert werden. Die Ergebnisdarstellung der Verarbeitungsoperationen ist für unterschiedliche Aufgabenstellungen von Bedeutung. Dazu zählt zum einen die Verifikation und Validierung des Messsystems. In diesem Zusammenhang ist vor allem die Bewertung der Verarbeitungsprozesse zur Verkehrsobjektdatengenerierung⁵⁸ zu nennen. Die Visualisierung der Verkehrsobjektdaten ermöglicht andererseits eine gezielte Datenauswahl zur Bestimmung von Intervallgrenzen für eine LSA-umlaufbezogene Ermittlung von Verkehrskenngrößen im Offline-Datenverarbeitungsbetrieb. Diese Vorgehensweise ist zur Bewertung der Effizienz der LSA-Steuerung sinnvoll.

Außerdem können im Zuge der Datenvisualisierung bestimmte Verkehrskenngrößen, z. B. die Wegräume bzw. Abstände der Verkehrsobjekte oder Aufstelllängen vor Haltelinien, nachträglich manuell bestimmt werden. Dadurch können die Prozesse zur Verkehrskenngrößenberechnung überprüft werden.

Die Darstellung von Daten auf einer mikroskopischen Ebene, d. h. Einzelfahrzeuge, ermöglicht eine manuelle Bewertung spezieller Verkehrssituationen, die algorithmisch nur mit größerem Aufwand umsetzbar sind. Dazu zählt die Analyse von Konfliktsituationen und Konflikträumen. Damit kann das Gefährdungspotenzial im Straßenverkehrsraum quantifiziert werden. Die Daten können zur Entscheidungsfindung bei verkehrsplanerischen Maßnahmen verwendet werden.

58. Verkehrsobjektextraktion, Geokodierung, Verkehrsobjekttracking Verkehrsobjektfusion

6 Verkehrssapplikationen

Von den berechneten Verkehrskenngrößen können verschiedene Verkehrsanwendungen partizipieren. Die primären Anwendungsfelder der Verkehrsdaten opto-elektronischer Sensoren liegen im Bereich der Lichtsignalanlagensteuerung und dem Routing von Verkehrsteilnehmern. In diesem Zusammenhang sind vor allem neuartige Steuerungs- und Routingansätze zu nennen, die auf streckenbezogene Verkehrskenngrößen angewiesen sind. Denkbar ist darüberhinaus die Verwendung der Daten für Forschungs- und Planungsaufgaben mit Verkehrsbezug. Die potenziellen Anwendungsgebiete sind insgesamt sehr vielfältig. An dieser Stelle werden einige Beispiele für verkehrliche Anwendungen vorgestellt, die von den abgeleiteten Daten profitieren können.

6.1 Lichtsignalanlagensteuerung

Zukünftig soll die herkömmliche Festzeitsteuerung durch verkehrsabhängige Verfahren abgelöst werden. Die Ansätze zur verkehrsadaptiven Steuerung basieren dabei auf streckenbezogenen Verkehrskenngrößen, [Krajzewicz, 2002], [Mikat, 2003]. Die Aufstelllänge ist zur Optimierung der LSA-Steuerung eine wichtige Kenngröße. Streckenbezogene Verkehrskenngrößen können derzeit nur über Querschnittsmessungen, z. B. an Induktionsschleifen, oder durch bewegliche Datenquellen, z. B. FCD, indirekt durch Extrapolation erhoben werden. Die Extrapolation punkthaft im Straßenraum ermittelter Verkehrskenngrößen auf einen größeren Abschnitt des Verkehrsnetzes ist jedoch mit gewissen Unsicherheiten verbunden. Streckenbezogene Kenngrößen lassen sich auf diese Art nicht exakt ermitteln. Diese Daten sind deshalb zur verkehrsabhängigen Steuerung auf der Basis neuartiger Konzepte nur bedingt geeignet. Die Auswertung von Daten opto-elektronischer Flächensensoren ermöglicht dagegen einer direkte Bestimmung streckenbezogener Verkehrskenngrößen.

Im Rahmen des Projektes OIS wurde ein neuartiges verkehrsadaptives Steuerungsverfahren getestet [Krajzewicz, 2002], [Mikat, 2003], [Verbundprojekt OIS, 2004]. Das Prinzip basiert auf folgenden Ansätzen. Innerhalb eines Zeitintervalls werden Verkehrsobjekte erfassungsbezogen summiert und die Verhältnisse zwischen Anzahl der Verkehrsobjekte einzelner Fahrspuren ermittelt. Anhand dieser Werte erfolgt für einzelne Fahrtrichtungen eine Verlängerung oder Verkürzung der Rot- und Grünphasen. Die adaptive LSA-Steuerung wurde zunächst für einzelne Verkehrsknoten entwickelt und anschließend auf einen größeren Ausschnitt des Verkehrsnetzes im Umfeld des Testfeldes ausgeweitet. Als Datenbasis der Netzsteuerung dienen ebenfalls die aus den Erfassungsbereichen ermittelten Verkehrsstärken und die Aufstelllängen an Fahrspuren.

Das beschriebene Verfahren wurde zur Validierung in ein Simulationswerkzeug⁵⁹ integriert. Anhand der Simulation wurden die verkehrlichen Wirkungen im Vergleich zu einer Festzeitsteuerung für den Verkehrsknoten des Testgebietes Rudower Chaussee - Wedegornstraße in Berlin Adlershof quantifiziert [Verbundprojekt OIS, 2004]. Das adaptive Steuerungsverfahren wurde mit realen Daten aus Verkehrszählungen erfolgreich getestet. Das Verfahren passt sich automatisch den veränderlichen Verkehrsstärken an. Die Bewertung des Ansatzes erfolgte anhand der Aufstelllängen vor Haltelinien. In Abb.34-35 wird deutlich, dass die Aufstelllängen bei der verkehrsadaptiven LSA-Steuerung im Vergleich zur Festzeitsteuerung geringer sind. Mit dem vorgestellten verkehrsadaptiven Steuerungsverfahren kann somit der Verkehrsfluss an einem Verkehrsknoten erhöht werden.

59. Simulation of urban mobility (SUMO)

Dadurch ist letztendlich eine effizientere Verkehrsbeeinflussung im Sinne der Reisezeitminimierung möglich. Die in dieser Arbeit vorgestellten Verkehrskenngrößen, primär die Aufstelllänge, können als Datengrundlage für diesen verkehrsabhängigen Steuerungsansatz dienen.

Die Anforderungen an die Datenaktualität sind im Bereich der Lichtsignalanlagensteuerung sehr hoch. Die vorgestellte Verarbeitungskette entspricht in diesem Punkt zum jetzigen Zeitpunkt allerdings nicht den Anforderungen, denn die Verkehrskenngrößenberechnung erfolgt anhand archivierter Daten im Offline-Verarbeitungsbetrieb.

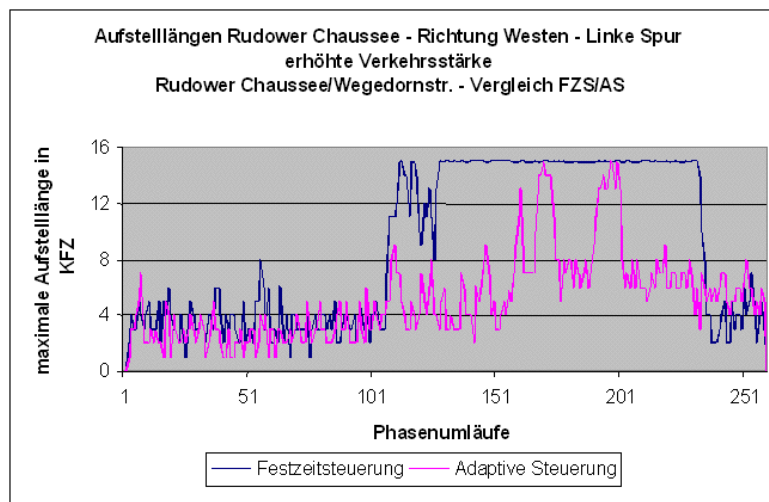


Abb. 34 Vergleich Festzeitsteuerung zu adaptiver Steuerung, Phasenumlaufbezogene Aufstelllängen einer Fahrspur am Verkehrsknoten Rudower Chaussee - Wegedornstraße bei erhöhter Verkehrsstärke (Verbundprojekt OIS, 2004)

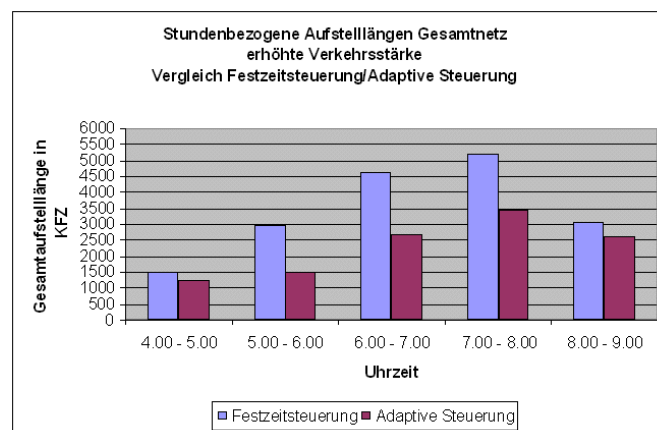


Abb. 35 Vergleich Festzeit- zu adaptiver Steuerung, Stundenbezogene Aufstelllängen benachbarter Verkehrsknoten im Umfeld des Verkehrsknotens Rudower Chaussee - Wegedornstraße bei erhöhter Verkehrsstärke (Verbundprojekt OIS, 2004)

6.2 Verkehrssimulation

Eine weitere Anwendung der in dieser Arbeit erzeugten Verkehrsobjektdaten und Verkehrskenngrößen besteht in der Überprüfung und der Kalibration von Fahrzeugfolgmodellen mikroskopischer flächenhafter Verkehrssimulationen. Das Ziel mikroskopischer Verkehrssimulationen besteht in der möglichst realitätsnahen Abbildung des Straßenverkehrs in Verkehrsnetzen auf der Basis von Einzelfahrzeugen. Grundlage sind einerseits Geometriedaten simulierter oder realer Verkehrsnetze, Abb.36. Innerhalb des Verkehrsnetzes werden außerdem weitere Randbedingungen festgelegt. Diese betreffen die Anzahl und Verteilung der Verkehrsteilnehmer im Netz sowie Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen, z. B. Vorfahrtsbeziehungen an Verkehrsknoten und LSA-Steuerungsprozesse. Die erforderlichen Daten sind entweder synthetisch oder basieren auf realen Messdaten. Sowohl die Anzahl der Verkehrsteilnehmer als auch deren Verteilung im Umfeld des Verkehrsknotens können mit der vorgestellten Prozesskette zur Verkehrskenngrößenbestimmung ermittelt und zur Verkehrssimulation bereitgestellt werden.

Die Bewegung der Verkehrsteilnehmer innerhalb des Straßennetzes erfolgt über ein Fahrzeugfolgmodell. Bei Fahrzeugfolgmodellen wird das Fahrverhalten eines Fahrzeugs an das Fahrverhalten vorausfahrender Fahrzeuge angepasst. Fahrzeugfolgmodelle basieren auf statistischen Annahmen. Dabei werden fahrzeugspezifische Parameter, z. B. das Beschleunigungsvermögen, die Geschwindigkeit, die Fahrzeuglänge sowie das individuelle Fahrverhalten einzelner Verkehrsteilnehmer berücksichtigt. Das Verhalten des einzelnen Verkehrsteilnehmers weicht jedoch in der Realität in unterschiedlichem Umfang von der Simulation ab. Anhand der Verfolgung von Verkehrsobjekten über einen größeren Abschnitt des Straßenraums durch ein opto-elektronisches Messsystem kann das Fahrverhalten im Pulk quantifiziert und mit dem Fahrzeugfolgmodell verglichen werden. Die in dieser Arbeit vorgestellten Verkehrsobjektdaten können somit zur Kalibration mikroskopischer Verkehrsfolgmodelle verwendet werden.

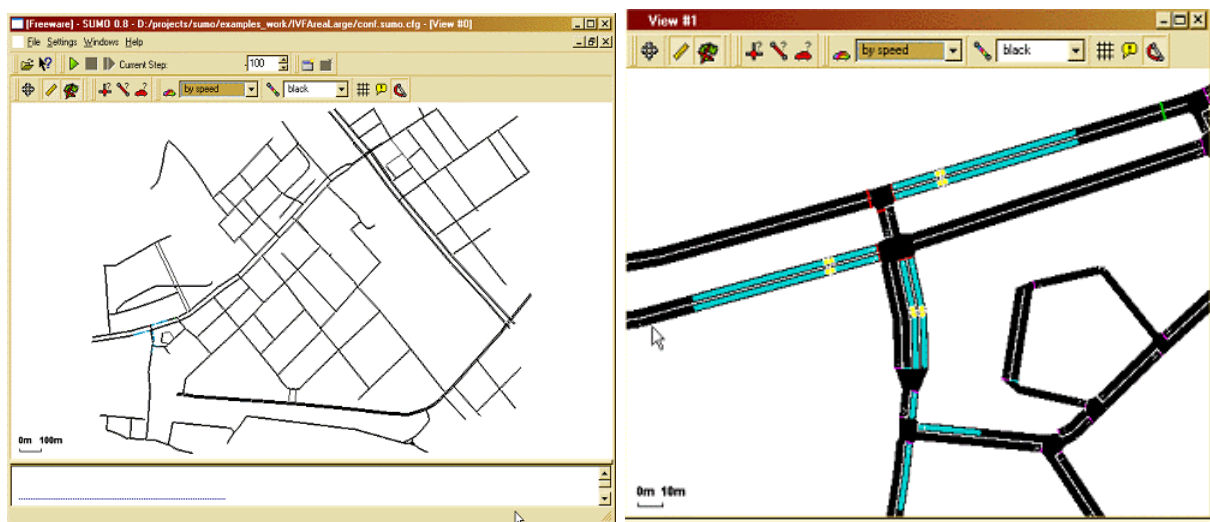


Abb. 36 Mikroskopische Verkehrssimulation SUMO - Links: Ausschnitt Straßennetz Berlin-Adlershof, Rechts: Verkehrsknoten Rudower Chaussee - Wedegornstraße, Erfassungsbereiche zur Berechnung streckenbezogener Verkehrskenngrößen (grün), Erfassungsbereiche zur Bestimmung querschnittsbezogener Verkehrskenngrößen (gelb) (Verbundprojekt OIS, 2004)

6.3 Routing

Das Routing von Verkehrsteilnehmern ist eine weitere Anwendung, bei der streckenbezogene Verkehrsdaten eines opto-elektronischen Messsystems verwendet werden können. Automatische Routingsysteme⁶⁰, die das aktuelle Verkehrsgeschehen bei der Routenwahl berücksichtigen, werden in Zukunft verstärkt zum Einsatz kommen. Mit diesen Systemen kann der Verkehrsteilnehmer dynamisch, d. h. verkehrsabhängig, durch das Verkehrsnetz geleitet werden. Die dynamische Zielführung ermöglicht im Vergleich zu Routingsystemen, bei denen die aktuelle Verkehrslage nicht in die Wegberechnungen einfließt, eine Reduzierung der Reisezeiten. Voraussetzung zur Optimierung des Routings sind aktuelle Verkehrsdaten.

Die Fahrwege der Verkehrsteilnehmer umfassen häufig größere Bereiche des Verkehrsnetzes. Dementsprechend sind für das dynamische Routing Daten übergeordneter Verkehrsmodelle auf städtischer Ebene erforderlich. Datengrundlage dieser Verkehrsmodelle sind Reisezeitdaten an und zwischen einzelnen Verkehrsknoten. Mit dem vorgestellten Sensor- und Datenverarbeitungskonzept sind die zum dynamischen Routing erforderlichen Daten direkt messbar. Die vorgestellte Umsetzung des Konzepts erlaubt die Erstellung räumlicher Verkehrsmodelle auf Verkehrsknotenebene. In dieser Raumkategorie können die Reisezeiten der Verkehrsteilnehmer bestimmt werden. Die Ermittlung verkehrsknotenübergreifender Kenngrößen ist dagegen zwar im Datenverarbeitungskonzept formuliert, war jedoch nicht Bestandteil der Arbeiten. In der Umsetzung des Konzepts können zumindest Reisezeitdaten an einzelnen Knotenpunkten ermittelt werden.

60. primär Fahrzeugnavigationssysteme

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Erfassung und Bewertung des Straßenverkehrsgeschehens in größeren zusammenhängenden Ausschnitten innerstädtischer und interregionaler Verkehrsnetzes ist für eine effektivere Verkehrsbeeinflussung in Zukunft unerlässlich. Opto-elektronische Flächensensoren sind prinzipiell zur Erhebung der erforderlichen Verkehrsdaten geeignet. Im Gegensatz zu anderen Messverfahren sind streckenbezogene Verkehrskenngrößen direkt bestimmbar. Dieses Potenzial wird derzeit jedoch aufgrund der Problematik der Verkehrsobjektdetektion durch die Bildverarbeitung und fehlenden Konzepten zur Einbindung in Telematiksysteme nicht bzw. nur eingeschränkt genutzt. Gegenstand dieser interdisziplinären Arbeit ist die flächenhafte Analyse des Straßenverkehrs auf der Basis verteilter bodengebundener opto-elektronischer Sensoren.

Einleitend wurde auf gegenwärtig verfügbare opto-elektronische Sensorsysteme zur Verkehrsdatenerfassung eingegangen, ihre Vor- und Nachteile diskutiert und Anforderungen an ein ideales opto-elektronisches Sensorsystem zur Auswertung größerer zusammenhängender Straßenverkehrsbereiche formuliert. Darauf aufbauend wurde ein Sensor- und Datenverarbeitungskonzept vorgestellt. Das Konzept sieht eine Integration mehrerer Sensoren zu einem skalierbaren, hierarchisch gegliederten Sensornetzwerk vor. Dadurch können zusammenhängende Straßenbereiche unterschiedlicher räumlicher Kategorien, von einem einzelnen Sensor bis zur gesamtstädtischen Ebene, beobachtet und in den Abbildungsbereichen der Sensoren Verkehrsdaten erhoben werden. Zur Umsetzung des vorgestellten Konzepts wurde ein Testfeld an einem Verkehrsknoten in Berlin-Adlershof aufgebaut und eine Datenverarbeitungskette installiert, die wesentliche Bestandteile des Konzepts, von der Bilddatenaufnahme bis zur Berechnung und Visualisierung der Verkehrsdaten auf Verkehrsknotenebene, enthält. In der Umsetzung wurde gezeigt, wie anhand der Daten mehrerer Sensoren, zusammengesetzte Abbildungs mosaiken eines vergrößerten Verkehrsraums erzeugt werden und darauf aufbauend Verkehrsdatenmodelle abgeleitet werden. Durch die vorgestellte Verarbeitungskette werden neue Anwendungsbereiche für geografische Informationssysteme (GIS) erschlossen. Diese liegen in der Konfiguration von Prozessketten und der Visualisierung kontinuierlicher Datenströme unter 4D Aspekten mittels GIS. Abschließend wurden Verkehrsanwendungen vorgestellt, die von den Verkehrsdaten partizipieren können. Die primären Verkehrsanwendungen sind Systeme zur Verkehrsbeeinflussung. Das Augenmerk liegt dabei im Bereich neuartiger Verfahren zur verkehrsadaptiven Steuerung von Lichtsignalanlagen sowie zum verkehrsadaptiven Routing von Verkehrsteilnehmern. Darüberhinaus können weitere Anwendungen mit Verkehrsbezug, z. B. Forschung und Planung, von den Daten partizipieren.

Die Informatik spielte als Werkzeug zur Umsetzung der Prozesskette und damit zur prinzipiellen Validierung des Konzepts eine entscheidende Rolle. Der beschriebene Ansatz ist in IDL realisiert und erfolgreich getestet worden.

Die vorgestellte Datenverarbeitungskette ist derzeit auf den nichtoperationellen Verarbeitungsbetrieb ausgelegt und nicht durchgängig automatisiert. Eine durchgängige Verarbeitung unter Echtzeitbedingungen ist das übergeordnete Ziel zukünftiger Aktivitäten. Dazu ist die Portierung von IDL auf eine andere Programmiersprache sowie Maßnahmen zur Optimierung im Bereich Datenmanagement notwendig. Darüberhinaus sind weitere Teile des Datenverarbeitungskonzepts umzusetzen. Aufgrund der speziellen Anforderungen, die an ein GIS bei der Verknüpfung mit der Sensorik zu einem Gesamtsystem zu stellen sind, ist der Einsatz hochverfügbarer GIS auch zukünftig fraglich.

Literatur

- [AG Prognos, 2001]: Arbeitsgemeinschaft Prognos AG: Wirkungspotentiale der Verkehrstelematik zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur- und Verkehrsmittelnutzung, Schlußbericht, Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin, (FE-Nr. 96.584/1999)
- [Beymer, 1998]: Beymer, D. et al: A Real-time Computer Vision System for Measuring Traffic Parameters, Dept. of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, California, In: <http://citeseer.ist.psu.edu/383445.html>
- [Claramunt, 2000]: Claramunt, C. et al: A New Framework for the Integration, Analysis and Visualisation of Urban Traffic Data Within GIS, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, An International Journal, Elsevier Science (Pergamon), pp. 167 - 184, 2000
- [Dailey, 1996]: Dailey, D.J. et al: A Structured Approach to Developing Real-Time, Distributed Network Applications for ITS Deployment, In: ITS Journal, 1996
- [Dailey, 1999]: Dailey, D.J., Li, L.: Video Image Processing to Create a Speed Sensor, ITS Research Program, Final Research Report College of Engineering, University of Washington, Seattle, 1999
- [Dalaff, 2002] Dalaff C. et al: Anforderungsanalyse für das Forschungsprojekt OIS des Arbeitsbereiches 3: Netzsteuerung, Unveröff. Institut für Verkehrsforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt und SSP Consult Beratende Ingenieure GmbH, Berlin, 2002
- [Dalaff, 2003a]: Dalaff, C. et al: A Traffic Object Detection System for Road Traffic Measurement and Management, In: Institute of Information Sciences and Technology, Massey University [Hrsg.]: IVCNZ Image + Vision Computing 03, S. 78-83, IVCNZ Image + Vision Computing 03, November 25-27, 2003, Palmerston North, New Zealand
- [Dalaff, 2003b]: Dalaff, C. et al: OIS - An optical Informationssystem for Road Traffic Measurement and Management, Joint Workshop of ISPRS Working Groups IV/3, IV/6 and IV/7, 8. - 9. September 2003, Uni Vechta Stuttgart, Germany
- [Frank, 1996]: Frank, Th. et al: Tracking of Occluded Vehicles in Traffic Scenes, In: Fourth European Conference on Computer Vision 1996 (ECCV'96), 15-18 April 1996, Cambridge/UK; B. Buxton and R. Cipolla (Eds.), Lecture Notes in Computer Science 1065 (Vol. II), Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1996, S. 485-494

-
- [Hetzheim, 2004a]: Hetzheim, H, Tuchscheerer, W.: An Image Processing Based Traffic Estimation System, Proceedings of TRANSTEC 2004, Technology Congress, CD-ROM, Athens/Greece (2004), paper PAN136
- [Hetzheim, 2004b]: Hetzheim, H.: Mündliche Mitteilung
- [Krauss, 1994]: Krauss, K.: Photogrammetrie, Band 1, Grundlagen und Standardverfahren, Dümmler Verlag, Bonn, 1994
- [Krajzewicz, 2002]: Krajzewicz, D. et al.: An Example of Microscopic Car Models Validation using the open source Traffic Simulation SUMO, In: Proceedings 14th European Simulation Symposium SCS Europe BVBA, 2002
- [Leich, 1997]: Leich, A. et al: Bildverarbeitung im Straßenverkehr, Zwischenbericht, Institut für Verkehrsinformationssysteme TU-Dresden, Dresden, 2001
- [Lorkowski, 2003]: Lorkowski, S. et al: Erste Mobilitätsdienste auf Basis von "Floating Car Data", In: Institut für Stadtbauwesen und Verkehr, RWTH Aachen [Hrsg.]: Tagungsband zum 4. Aachener Kolloquium "Mobilität und Stadt", Band 75, Jahrgang 2003, Reihe Stadt Region Land, S. 93-100, 4. Aachener Kolloquium "Mobilität und Stadt" AMUS, 31.7.-1.8, Aachen, 2003
- [Luhmann, 2000]: Luhmann, T.: Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen, Methoden und Anwendungen, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000
- [Malik, 1997]: Malik, J. et al: A Machine Vision Based Surveillance System for California Roads, In: PATH project MOU-83 Final Report, Computer Science Division University of California, USA, 1997
- [Matheja, 2000]: Matheja, A, Lichy, C.: Grundlagen für den Aufbau verteilt agierender Umweltinformationssysteme, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Heft 84, 2000
- [Mikat, 2003]: Mikat, J. et al: Agend Based Traffic Signals On A Basic Grid, Institute of Transport Research, German Aerospace Center, Berlin, 2003
- [Mirchandani, 2002]: P. Mirchandani et al: Application of arial video for traffic flow monitoring and management, In: Pecora 15/Land Satellite Information IV/ ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings, 2002
- [Mück, 2002]: Mück, J. et al: Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren, In: Straßenverkehrstechnik 11, S. 613, Bonn, 2002
- [Mück, 2003]: Mück, J. et al: BALANCE: Adaptive Lichtsteuerungen für Straßennetze und einzelne Knotenpunkte, In: Akademie für Technikfolgen-Abschätzung, München, 2003

-
- [NIT PHASE II, 2002]: NIT PHASE II, Evaluation of non-intrusive technologies for traffic detection, Prepared for: United States Department of Transportation Federal Highway Administration, Prepared by: Minnesota Department of Transportation Office of Traffic Engineering/ITS Section St.Paul and SRF Consulting Group, Inc. Minneapolis, SRF No.3683, 2002
- [Reulke, 2002a]: Reulke, R.: A Sensor Web for Road-Traffic Observation, In: Image and Vision Computing, New Zealand 26-28, November 2002, S. 293-297,
- [Reulke, 2002b]: Reulke, R.: Sensorfusion, In: Software-Review OIS, Institut für Photogrammetrie (ifp), Universität Stuttgart, Berlin, 2003
- [RiLSA, 1992]: Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA 92), 1992
- [Schäfer, 2003]: Schäfer, R.-P. et al: Neue Ansätze im Verkehrsmonitoring durch Floating Car Daten, 19. Verkehrswissenschaftliche Tage "Mobilität und Verkehrsmanagement in einer vernetzten Welt", 22. bis 23. September 2003, Technische Universität Dresden
- [Schischmanow, 2003]: Schischmanow, A. et al: Konzept zur Ableitung von Verkehrsdaten und Verkehrsinformationen auf der Basis eines opto-elektronischen Sensornetzwerkes, In: Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XV. S.425-430, Salzburg, 2003
- [Schischmanow, 2004]: Schischmanow, A. et al: Ableitung fahrspurbezogener Verkehrskenngrößen aus Bilddaten eines opto-elektronischen Sensornetzwerkes und deren 4D-Datenvisualisierung und -analyse mittels GIS, In: Angewandte Geoinformatik 2004, Beiträge zum 16. AGIT-Symposium, S.595-604, Salzburg, 2004
- [Schlotzhauer, 2004]: Schlotzhauer, G. et al: Abschlussbericht zum Verbundprojekt „Optische Informationssysteme (OIS) zur Verkehrsszenenanalyse und Verkehrslenkung, TP 2: Sensorentwicklung und Bildverarbeitung, Förderkennzeichen 03WKJ02B, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e. V., Einrichtung optische Informationssysteme, Berlin, 2004
- [Schmidt, 1999]: Schmidt, F., Krüger, U.: Eigenschaften von digitalen 1Chip-CCD-Kameras bei der Anwendung zur Farbbeurteilung und Farbdarstellung, In: 5. Workshop Farbbildverarbeitung, Ilmenau, 1999
- [Strauch, 2002]: Strauch, D. et al: Neue Ansätze zu einer mikroskopisch-dynamischen Verkehrs- und Flächennutzungsplanung im Verbundprojekt ILU-MASS, In: Tavangarian, D.; Grützner, R. [Hrsg.]: Simulationstechnik, SCS Publishing House, Band 12, Reihe Frontiers in Simulation, S. 511-516, 2002
- [Tissot, 2004]: Tissot, J.L.: IR detection with uncooled focal plane arrays, State-of-the art and trends, In: Opto-electronics review 12(1), pp. 105-109, France, 2004

-
- [Tsatalpasidis, 2000]: Tsatalpasidis, D.: Die Verwendung von Verkehrsdaten aus Videoerfassung als Steuerungsgrundlage von verkehrsabhängigen Netzsteuerungen, Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Stuttgart, 2000
- [Tuchscheerer, 2003]: Tuchscheerer, W.: Systemkonzept VSIM - Verkehrsfluß- und Steuerungssimulation, Unveröff. Institut für Verkehrsforschung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Berlin, 2003
- [Valsecchi, 1999]: Valsecchi, P. et al: An inter-operable system for the integration of real-time traffic data within GIS, In: Computers, Environment and Urban Systems 23, P. 245-257, 1999
- [Verbundprojekt OIS]: Optische Informationssysteme (OIS) zur Verkehrsszenenanalyse und Verkehrslenkung, Präsentation des OIS-Demonstrators, Berlin, 2004
- [Vogel, 2001]: Vogel, R., Graf, A.: Verkehrszustandserfassung und -darstellung, Diplomarbeit, 2001
- [Voss, 2003]: Voss, F., Grüber, B.: Verkehrslageerfassung aus der Luft, Verfahren zur automatisierten Auswertung von Thermal-Infrarot-Luftbildern, In: Straßenverkehrstechnik, Heft 2, Seite 75, 2003
- [Wiggenhagen, 2004]: Wiggenhagen, M.: Optische Informationssysteme für die Verkehrsszenenanalyse und Verkehrslenkung (OIS), Einsatz photogrammetrischer Methoden, Abschlußbericht, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Hannover, 2004
- [Woesler, 2003]: Woesler, R.: Fast extraction of traffic data and reidentification of vehicles from video data, In: IEEE Conference Proceedings, Reihe IEEE catalog number 03TH8708C, 2003
- [www-adv]: <http://www.adv-online.de/produkte/etrs89.htm>
- [www-ccdinfo]: <http://home.t-online.de/home/dennismoeller/Infomaterial/InfoMaterial.html>
- [www-creaso]: <http://www.creaso.com>
- [www-CityRouter]: <http://www.cityrouter.com/index.html>
- [www-EU-Weissbuch]: http://europa.eu.int/comm/energy_transport/library/orientations-lb-de.pdf
- [www-Eye in the sky]: http://www.dlr.de/vf/forschung/projekte/eye_in_the_sky
- [www-ESA-FCD]: http://esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet115/chapter7_bul115.pdf
- [www-GeoLexikon]: <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de>

[www-ITS-Research]: http://www.its.washington.edu/its_pubs.html

[www-ITS-Sides]: http://www.its.washington.edu/its_sites.html

[www-Little-Idiot]: <http://www.little-idiot.de/mysql/>

[www-LISA]: <http://ipi216.ipi.uni-hannover.de/lisa/>

[www-LoopClient]: http://www.its.washington.edu/software/loop_cli.html

[www-Lumos]: <http://www.dlr.de/vf/forschung/projekte/lumos>

[www-Mobinet]: <http://www.mobinet.de>

[www-Multisat]: <http://www.dlr.de/vf/forschung/projekte/multisat>

[www-MYSQL]: <http://www.mysql.com>

[www-NRW]: <http://www.autobahn.nrw.de/>

[www-Parallaxe]: <http://docs.kde.org/de/HEAD/kdeedu/kstars/ai-parallax.html>

[www-PysikerBoard]: http://www.physikerboard.de/lexikon/index.php/Gr%C3%9Cne_Welle

[www-SeattleTraffic]: <http://www.wsdot.wa.gov/PugetSoundTraffic/>

[www-Tegaron]: http://www.t-traffic.de/t_traffic/index.html

[www-TrafNet]: <http://www.its.washington.edu/trafnet/>

[www-UniRostock]: <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/>

[www-Vendors]: <http://projects.dot.state.mn.us/nit/nonintrusivevendors.html>

[www-VerkehrWien]: <http://www.cityrouter.com/vema/fcd/fahrzeiten.jsp>

[www-VideoTrak]: <http://www.peek-traffic.com/>

[www-ViVATraffic]: <http://transport.arubi.uni-kl.de/ViVATraffic/>

[www-Waypnt]: <http://waypnt.com>

[www-Wolf]: <http://www.vermessung-wolf.de/>

[Zagel, 2000]: Zagel, B.: GIS in Transport und Verkehr, Herbert Wichmann Verlag, 2000

Anhang A: Abkürzungen

CAD	-	Computer Aided Design
CCD	-	Charged-Coupled Device
CMOS	-	Complimentary Metal-Oxide Semiconductor
DLR	-	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DGPS	-	Differential Global Positioning System
DSP	-	Digital Signal Processor
ETRS89	-	European Terrestrial Reference System 1989
GSD	-	Ground Sample Distance
FCD	-	Floating Car Data
FOV	-	Field Of View
FPGA	-	Field Programmable Gate Array
GIS	-	Geografische Informationssysteme
GPS	-	Global Positioning System
IDL	-	Interactive Data Language
ILUMASS	-	Integrated Land-Use Modelling And Transportation System Modelling
ITS	-	Intelligent Transport Systems
LSA	-	Lichtsignalanlagen
LUMOS	-	Luftgestütztes Verkehrsmonitoring - System
MEZ	-	Mitteleuropäische Zeit
MPEG	-	Motion Pictures Experts Group
ODBC	-	Open Database Connection
OIS	-	Optische Informationssysteme für die Verkehrsszenenanalyse und Verkehrslenkung
OSIRIS	-	Inter-Operable System For The Integration Of Real-Time Traffic Data Within GIS
ÖPNV	-	Öffentlicher Personennahverkehr
PAL	-	Phase Alternating Line
PRNU	-	Photo Response Non-Uniformity
RDBMS	-	Real Time Database Management Systems
RDS	-	Radio Data System

ROI	-	Region(s) Of Interest
SQL	-	Structured Query Language
s/w	-	schwarz / weiß
TIR	-	Thermal Infrared
TMC	-	Traffic Message Channel
VIS	-	Visible
VO	-	Verkehrsobjekt
UTC	-	Coordinated Universal Time
UTM	-	Universal Transverse Mercator
WGS84	-	World Geodetic System 1984
XGA	-	Extended Graphic Array

Anhang B: Tabellen

Sensor-ID	Hersteller	Modell	Sensortyp	Spektrale Empfindlichkeit	Radio-metrische Auflösung [Bit]	Pixelanzahl	Bildwiederhol-frequenz [Hz]
1	Dalsa	DS11-01M28	CMOS	VIS	8-10	1024 x 1024	>25
2	Matrix Vision	mvCam	CCD	VIS	8	1024 x 768	4-6
3	Hitachi	KP-M1AN	CCD	VIS	8	768 x 576	4-6
4	Hitachi	HV-C20	CCD	VIS	8	795 x 596	4-6
5	NEC	TS3702	IR-Bolometer	TIR (8-14µm)		320 x 240	25
6	DLR	OS IR1	IR-Bolometer	TIR (8-14µm)	14	320 x 240	>25
7	Dalsa	CT-E4-4096W	CCD-Zeile	VIS	8	4096	

Tab. 5 Sensoren

Anforderung	Anmerkung	Wert
Größe der Beobachtungsbereiche	Zufluss Verkehrsknoten Abfluss	120m ca. 50m 20m
Anzahl Sensoren an einem Verkehrsknoten	Jede Zuflussrichtung	1
Anzahl durch einen Sensor zu beobachtende Fahrspuren im Zufluss	in Abhängigkeit der Größe des Verkehrsknotens	normal 2-3, max. 6-8
Ortsauflösung (Ground Sample Distance)	Verkehrsobjektdetektion Wiedererkennung	max. 0.5-1m max. 0.1m

Tab. 6 Anforderungen an das Sensorsystem, Räumliche Datenverfügbarkeit

Anforderung	Anmerkung	Wert
Pixelanzahl	VIS TIR	ca. 720 x 576 Pixel (PAL) bis 1024 x 768 Pixel (XGA) ca. 320 x 240 Pixel
Öffnungswinkel Field Of View (FOV)	Normaler Abstand zwischen Sensor und Straße (Sensorhöhe über Straße ca. 15-20m) großer Abstand zwischen Sensor und Straße geringer Abstand zwischen Sensor und Straße	ca. 60° ca. 20° ca. 120°

Tab. 7 Anforderungen an das Sensorsystem, Sensorgeometrie

Anforderung	Anmerkung	Wert
Kleine Erfassungsbereiche (Querschnittsbeobachtung)	equivalent zu vergleichbaren optoelektronischen Verkehrsmesssystemen	>90%
Große Erfassungsbereiche (Streckenbeobachtung)	abhängig von potenziellen Verkehrsanwendungen, Erfassungsbereichsgröße, Umweltbedingungen etc. optimal - Verfolgung von Beginn bis Ende der Anwesenheit im Erfassungsbereich	Ziel: Ausweitung der Detektionsqualität herkömmlicher Videodetektion von Querschnittsmessungen auf größere Erfassungsbereiche, d. h. Detektionsrate von >90%

Tab. 8 Anforderungen an das Sensorsystem, Detektionssicherheit

Anforderung	Anmerkung	Wert
Anzahl Verkehrsobjekte bzw. Datensätze	je beobachtete Fahrspur	ca. 35 je 1/6s = ca. 210 je s
Anzahl Merkmale je Verkehrsobjekt		10-15
Anzahl Dateneinträge in Speichersysteme	je beobachtete Fahrspur	ca. 350-530 je 1/6s = 2100-3200 je s
Speicherbedarf Verkehrsobjektdaten	Bsp: 32Bit-Werte Bsp: 64Bit-Werte	ca. 160-280Byte je 1/6s = 960-1120Byte je s ca. 320-560 Byte je 1/6s = 1920-3360 Byte je s
Speicherbedarf Bilddaten	s/w 8Bit unkomprimiert RGB 8Bit unkomprimiert	ca. 0.5-1 MByte ca. 1.5-3 MByte

Tab. 9 Anforderungen an das Sensorsystem, Datenaufkommen am Sensor je beobachteter Fahrspur

Parameter	Wert
X_0	399850.67m
Y_0	5809688.65m
Z_0	94.68m
ϕ	0.49rad
ω	0.97rad
κ	0.58rad

Tab. 10 Äußere Orientierung, Sensorstandort-ID 1, Sensor-ID 1

Parameter	Wert
X_0	399864.15m
Y_0	5809748.17m
Z_0	57.67m
ϕ	-2.13rad
ω	-2.54rad
κ	-1.29rad

Tab. 11 Äußere Orientierung, Sensorstandort-ID 2, Sensor-ID 1

Passpunkt-ID	Abweichung X [m]	Abweichung Y [m]	Abstand zum Sensor [m]
21	0.19	0.19	78.91
22	0.41	0.52	71.66
29	0.92	0.33	93.17
30	0.30	0.33	87.92
75	0.22	0.67	81.67
76	0.17	0.80	84.28
77	0.16	0.32	84.38
78	0.23	0.70	59.60
79	0.09	0.41	54.56
80	0.04	0.18	54.17
81	0.12	0.26	48.33

Tab. 12 Abweichung zwischen Objektkoordinaten der Passpunkte (DGPS-Messung) und photogrammetrisch ermittelten Objektkoordinaten, Sensorstandort-ID 1, Sensor-ID 1

Passpunkt-ID	Abweichung X [m]	Abweichung Y [m]	Abstand zum Sensor [m]
84	0.00	0.24	45.46
85	0.03	0.29	45.58
87	0.02	0.34	41.94
88	0.03	0.27	41.97
92	0.25	0.11	72.24
93	0.35	0.20	76.57
96	0.00	0.93	86.35

Tab. 12 Abweichung zwischen Objektkoordinaten der Passpunkte (DGPS-Messung) und photogrammetrisch ermittelten Objektkoordinaten, Sensorstandort-ID 1, Sensor-ID 1

Passpunkt-ID	Abweichung X [m]	Abweichung Y [m]	Abstand zum Sensor [m]
2	0.89	1.16	54.15
3	0.03	0.17	60.58
5	2.81	2.69	78.64
8	3.26	2.26	87.11
12	0.87	0.33	88.60
13	1.44	0.70	82.77
242	1.44	0.84	58.27
400	0.55	0.52	67.16
402	2.56	1.46	162.12
404	0.52	0.40	87.38
405	0.43	0.41	89.66
406	1.17	0.78	81.68

Tab. 13 Abweichung zwischen Objektkoordinaten der Passpunkte (DGPS-Messung) und photogrammetrisch ermittelten Objektkoordinaten, Sensorstandort-ID 2, Sensor-ID 1

Sensorstandort-ID	Mittlere Abweichung X [m]	Mittlere Abweichung Y [m]	Standardabweichung X [m]	Standardabweichung Y [m]
1	0.20	0.40	0.22	0.23
2	1.33	0.98	1.02	0.79

Tab. 14 Statistische Abweichung zwischen Objektkoordinaten der Passpunkte (DGPS-Messung) und photogrammetrisch ermittelten Objektkoordinaten

Fahrspurpunkt-ID	East (X) [m]	North (Y) [m]	Punktabstand [m]	Summe Punktabstände [m]
1	399990.34	5809799.00	0.00	0.00
2	399991.20	5809799.10	0.85	0.85
3	399992.03	5809799.25	0.84	1.70
4	399992.81	5809799.50	0.82	2.52
5	399993.57	5809799.91	0.85	3.38
6	399994.28	5809800.43	0.87	4.26
7	399994.97	5809801.00	0.89	5.16

Tab. 15 Geometrische Representation von Fahrspuren

Anhang C: Entwicklungswerkzeuge

Programmierung

- | | | |
|---|---|---|
| Interactive Data Language (IDL) 5.6 / 6.0 | - | [www-creaso] |
| Structured Query Language (SQL) | - | [www-MySQL], [www-Little-Idiot] |

Datenbank

- | | | |
|---------------------------------|---|-------------------------------|
| MySQL 4.0.12 | - | [www-MySQL] |
| WinMysqladmin 1.4 | - | [www-MySQL] |
| Mysql-Control Center 0.9.2-beta | - | [www-MySQL] |

Geometrische Kamerakalibration

- | | | |
|----------|---|------------------------------|
| LISA 4.0 | - | [www-LISA] |
|----------|---|------------------------------|

DGPS-Prozessierung

- | | | |
|-------------------|---|--------------------------------|
| GravNav / GravNet | - | [www-waypnt] |
|-------------------|---|--------------------------------|

Fernerkundungssoftware / Bildbetrachter

- | | | |
|----------|---|--------------------------------|
| Envi 3.4 | - | [www-creaso] |
|----------|---|--------------------------------|

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass

- ich die vorliegende Dissertationsschrift „Analyse des Straßenverkehrs mittels verteilter opto-elektronischer Sensoren“ selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe,
- ich mich nicht bereits anderwärts um einen Doktorgrad beworben habe oder einen solchen besitze,
- mir die Promotionsordnung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II der Humboldt-Universität zu Berlin bekannt ist.

Berlin, 21. Februar 2005

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich den Personen herzlich danken, die zur Realisierung der Arbeit beigetragen haben.

- Herrn Prof. Ralf Reulke, Frau Prof. Barbara Lenz und Herrn Prof. Jahn für ihre Gutachtertätigkeit und ihr Interesse an der Arbeit
- Ralf Reulke, der sich für eine Promotionsstelle am DLR eingesetzt hat und damit die Voraussetzungen für diese Arbeit geschaffen hat, für seine kreativen Ideen und für seine Geduld
- Anko Börner, der in den vergangenen Jahren darauf geachtet hat, dass ich den rechten Pfad finde, sein Engagement bezüglich der Verlängerung, ohne die diese Arbeit nicht realisierbar gewesen wäre, und nicht zuletzt für seine Freundschaft
- meinem „Raumteiler“ Hartwig Hetzheim für die ausgesprochen angenehme Zusammenarbeit und seinen weisen Rat
- Martin Scheele für sein Engagement bei der didaktisch brillanten Vermittlung unerschöpflichen Wissens sowie für unzählige Liter Schwarztee und Cappuccino
- den Korrektoren der Arbeit Anko Börner, Gerald Schlotzhauer und David Krutz für ihre Mühe und wertvollen Hinweise
- den Promotionsbrüdern bzw. der „Jugendbrigade“ (Thomas „Terzi“ Terzibaschian); Karsten „il piccolo“ Scheibe, Dennis „the mennis“ Griebach und David „the brain“ Krutz für die unzähligen Cappucinorunden, Freizeitaktivitäten und fachlichen Anregungen
- und -schwestern Kerstin Ebert und Jana Mendrok (der letztgenannten vor allem für die Hilfe bei der Durchführung von Messkampagnen)
- den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abteilung Informationsverarbeitung optischer Systeme für das sehr kollegiale und angenehme Arbeitsklima
- den Kollegen des „Ballistikseminars“ für die wöchentlichen Ausflüge in die Welt des Fußballs
- und natürlich meinen lieben Eltern, die mich unterstützten, wie es nur Eltern können, meiner Schwester und meinem Bruder sowie allen Freunden

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Adrian Schischmanow
Geburtsdaten: 11. September 1972, Russe (Bulgarien)
Familienstand: ledig
Nationalität: deutsch
Adresse: Emile-Zola-Str. 10, 16540 Hohen Neuendorf
Telefon: +49-177-5758728
eMail: adrian.schischmanow@web.de

Ausbildung und Berufstätigkeit

Promotion: seit September 2000 am DLR in Berlin
Praktikum: Dezember 1998 - März 1999 am DLR in Berlin
März 1997 - Juni 1997 an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald
Wissenschaftliche Hilfskraft: 1994 - 1998 am Geografischen Institut der Humboldt-Universität zu Berlin
Studium: September 1992 - Juni 2000, Studiengang Geografie an der Humboldt-Universität zu Berlin
Abschluss: Diplomgeograf
Zivildienst: September 1991 - September 1992 orthopädische Klinik in Birkenwerder
Schule: 1989 - 1991 Erweiterte Oberschule in Hennigsdorf
Abschluss: Abitur
1979 - 1989 Polytechnische Oberschule in Hohen Neuendorf

Berlin, 21. Februar 2005